



Marika Melander

Kivituhkan soveltuminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineeksi

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 21.5.2018

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaajat: Anniina Määttänen ja Taavi Dettenborn

Tekijä Marika Melander

Työn nimi Kivituhkan soveltuminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineeksi

Koulutusohjelma Master's Programme in Geoengineering

Koodi ENG23

Työn valvoja Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaajat Anniina Määttänen, Taavi Dettenborn

Päivämäärä 21.5.2018

Sivumäärä 63 + 31

Kieli suomi

Tiivistelmä

Infrarakentamisen suurimmat haasteet liittyvät maa- ja kiviaineksien taloudelliseen ja ekologiseen käyttöön. Jotta uusiutumattomia materiaaleja voidaan käyttää kestävästi, infrarakentamisessa on kehitettävä uusia suunnitteluratkaisuja, parannettava vanhojen rakenteiden materiaalien kierrättämistä, lisättävä heikompilaatuisten kiviaineksien käyttöä ja vähennettävä rakennusalan ylijäämämateriaaleja. Kerrosstabilointi on tien parantamisen menetelmä, jonka avulla voidaan parantaa huonolaatuisen kiviaineksen ominaisuuksia tai vähentää päällysrakenteessa vaadittavaa kerrospaksuutta. Kerrosstabiloinnissa tien jakava tai kantava kerros sidotaan sideaineella, joka voi olla esimerkiksi sementtiä tai bitumia. Kerrosstabilointi soveltuu sekä uusien teiden rakentamiseen että vanhojen teiden parannukseen.

Kivituhka on hienoa kalliomursketta, jota syntyy kiviainestuoannon sivutuotteena. Kivituhkaa muodostuu tuotantoprosessin aikana, mutta myös silloin kun valmistetaan katkaistuja lajikkeita. Kivituhkan korkea hienoaainespitoisuus aiheuttaa routivuutta rajoittaen sen käyttöä maarakentamisessa. Kivituhkan käytettävyyteen vaikuttaa sen teknisten ominaisuuksien lisäksi myös tuotantopaikkojen ja käyttökohteiden etäisyys toisistaan. Kivituhkaa voidaan käyttää kohteissa, joissa routivuudella ei ole merkitystä, mutta nykyisten käyttökohteiden menekki on huomattavasti pienempi kuin syntyvän kivituhkan määrä.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää, soveltuuko kivituhka stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineeksi. Tutkimuksessa tehtiin kahdeksan erilaista massaa, joiden runkoaineena oli kivituhka. Sideaineina käytettiin sementtiä, lentotuhkaa, masuunikuonaa sekä Ecolan Oy:n valmistamaa uusiosideainetta. Vertailukohteena käytettiin perinteisestä stabilointimassasta, eli murskeen ja sementin seoksesta, valmistettuja koe-kappaleita. Stabilointimassojen lujuus mitattiin yksiaksiaalisen puristuskokeen avulla, minkä lisäksi massojen pakasrapautumiskestävyyttä arvioitiin jäädytys-sulatuskokeen avulla. Yksiaksiaalinen puristuskoe tehtiin kaikille massoille sekä seitsemän että 28 päivän ikäisenä, kun taas jäädytys-sulatuskoe tehtiin 7d puristuslujuuden ja hinnan perusteella kolmelle parhaalle massalle. Jäädytys-sulatuskokeeseen valittiin sementtistabiloitu, lentotuhkalla stabiloitu sekä Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa. Lisäksi myös referenssimateriaalille tehtiin jäädytys-sulatuskoe. Tutkimuksessa onnistuttiin valmistamaan kaksi eri stabilointimassaa, joiden runkoaineena oli kivituhka o/3, ja jotka täyttivät Tiehallinnon julkaisun Päällysrakenteen stabilointi (2007 b) vaatimukset tutkimuksessa tehtyjen kokeiden osalta. Vaatimukset täyttävistä massoista toinen oli stabiloitu sementillä ja toinen Ecolan Oy:n uusiosideaineella.

Avainsanat kivituhka, kerrosstabilointi, uusiomateriaalit



Author Marika Melander		
Title of thesis Suitability of by-product fines for stabilized base course		
Degree programme Master's Programme in Geoengineering		
Major Geoengineering		Code ENG23
Thesis supervisor Leena Korkiala-Tanttu		
Thesis advisors Anniina Määttänen, Taavi Dettenborn		
Date 21.5.2018	Number of pages 63 + 31	Language Finnish

Abstract

The greatest challenges in infraconstruction are related to the economic and ecological use of rock materials. In order to achieve sustainable use of non-renewable materials, new design solutions must be developed, recycling of old materials must be improved, use of low-quality materials must be increased and the amount of waste material must be reduced. Stabilization is a road improvement method, which can be used to improve the qualities of rock material or to reduce the required layer thickness. In stabilization, either the sub-base or the base course can be bound with a binder, which is usually cement or bitumen. Stabilization is suitable for new construction and improving old roads.

Fine crushed aggregates are formed as a by-product of aggregate production. Fine material is formed during the production process, but also when cut fractions are manufactured. The high amount of fine material restricts the use of by-product fines of aggregate production, because fine material is frost susceptible. In addition, aggregate crushing plants are not usually close to possible application sites. The by-product fines of aggregate production can be utilized on sites, where frost susceptibility does not matter. However, the amount of by-product fines is much higher than the consumption at possible application sites.

The objective of this master's thesis was to determine if by-product fines could be used as aggregate in stabilized base course. In this study, eight stabilization masses containing by-product fines were made. Cement, fly ash, granulated blast furnace slag and a mixture of ash and cement produced by Ecolan Oy were used as binder. A traditional stabilization mass, containing normal size aggregate and cement, was made to act as a reference material. The strength of the masses was measured using unconfined compression test. In addition, the frost weathering resistance of the masses was determined with freezing and thawing test. All stabilization masses were subjected to the unconfined compression test at the age of seven and 28 days. The masses, which were subjected to the freezing and thawing test, were selected based on the 7d compressive strengths and the prices of the stabilization masses. Masses containing cement, fly ash and the binder produced by Ecolan Oy were selected to the freezing and thawing test. Two of the stabilization masses containing by-product fines met the requirements of stabilization masses set by Finnish Transport Agency. One of the masses, which met the requirements, was stabilized with cement, and the other with the binder produced by Ecolan Oy.

Keywords by-product fines of aggregate production, stabilization, recycled materials

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty YIT Infra Oy:lle kevään 2018 aikana. Työ on tehty osana EU Life IP Circwaste -hanketta.

Diplomityön ohjaajina toimivat Anniina Määttänen YIT Infra Oy:stä ja Taavi Dettenborn Ramboll Finland Oy:stä. Työn valvojana toimi Leena Korkiala-Tanttu Aalto-yliopistosta. Kiitos kaikille neuvoista ja tuesta työn aikana, sekä työn tiukan aikataulun mahdollistamisesta.

Espoo 21.5.2018

Marika Melander

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
1 Johdanto	6
2 Tien päällysrakenne	8
2.1 Tien rakennekerrokset	8
2.2 Kosteus, routivuus ja jännitykset tierakenteessa	9
2.3 Tien päällysrakenteen suunnittelu	13
3 Kerrosstabilointi	16
3.1 Kerrosstabilointi	16
3.2 Sekoitusmenetelmät	16
3.3 Stabilointimenetelmät	20
3.4 Stabiloinnin suunnittelu	23
4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit	25
4.1 Kalliomurske	25
4.2 Kivituhka	26
4.3 Sementti	29
4.4 Lentotuhka	30
4.5 Masuunikuona	31
4.6 Ecolan Oy:n uusiosideaine	34
5 Laboratoriotutkimukset	35
5.1 Runkoaineiden ominaisuudet	35
5.2 Koekappaleiden valmistus ja säilytys	36
5.3 Puristuslujuus	39
5.4 Pakkasrapautumiskestävyys	40
6 Tutkimustulokset	43
6.1 Runkoaineiden ominaisuudet	43
6.2 Puristuslujuus	45
6.3 Pakkasrapautumiskestävyys	50
6.4 Stabilointimassojen hinnat	53
6.5 Tulosten yhteenveto	54
6.6 Tulosten luotettavuus	55
7 Johtopäätökset	57
Lähdeluettelo	59
Haastattelut	62
Liiteluettelo	63
Liitteet	

1 Johdanto

Laadukkaat ja toimivat liikenneyhteydet ovat tärkeitä yhteiskunnan toiminnalle. Niiden rakentaminen ja ylläpito kohtuullisilla kustannuksilla sekä pienillä ympäristöhaitoilla on kuitenkin haastavaa. Suurimmat haasteet infrarakentamisessa liittyvät maa- ja kiviaineksien käyttöön. Suomessa tierakenteita on perinteisesti suunniteltu kokemuseräisten menetelmien avulla, mikä on johtanut siihen, että suunnittelussa on suosittu vakiopoikkileikkauksia ja -materiaaleja. Vakiintuneiden suunnitteluratkaisujen takia tierakenteissa on käytetty tarpeettoman suuria määriä hyvälaatuisia kiviaineksia. (Kolisoja 1997.) Suomi on asukasmäärään suhteutettuna yksi Euroopan Unionin suurimmista kiviaineksen käyttäjistä, ja Suomessa käytetään kiviaineksia noin 100 miljoonaa tonnia vuodessa. 20 % kiviaineksista saadaan rakentamisalueelta ja 80 % tuodaan maa-aineksien otto- ja kaatopaikoilta. Suomessa kiviaineksen kulutusta kasvattaa muun muassa maan suuri pinta-ala yhdistettynä pieneen väestötiheyteen. Lisäksi kylmän ilmaston aiheuttamat ilmiöt, kuten maaperän routiminen ja päällysteiden kuluminen nastarenkaiden vaikutuksesta lisäävät kiviaineksen kulutusta. (Tiehallinto 2007 c, Työ- ja elinkeinoministeriö 2015.) Jotta uusiutumattomia materiaaleja voidaan käyttää taloudellisesti ja ekologisesti, infrarakentamiseen täytyy kehittää uusia suunnitteluratkaisuja. Lisäksi on parannettava vanhojen rakenteiden materiaalien kierrättämistä, lisättävä heikompilaatuisten kiviaineksien käyttöä ja vähennettävä rakennusalan ylijäämämateriaaleja.

Kiviaineksen taloudellisen ja ympäristöystävällisen käytön tavoittelu sekä luonnonkiviaineksen saatavuuden heikentyminen ovat lisänneet korvaavien materiaalien käytön kiinnostusta. Uusien maa-aineksen otto- ja kaatopaikkojen ympäristölupien saantia on vaikeutettu asutuskeskusten läheisyydessä, mikä on kasvattanut kiviaineksen kuljetusmatkoja ja hintoja. (Tiehallinto 2007 c.) Kiviaineksen hinnasta noin puolet muodostuu kuljetuskustannuksista, minkä lisäksi pitkät kuljetusmatkat lisäävät ympäristön kuormitusta (Työ- ja elinkeinoministeriö 2015). Korvaavien materiaalien käyttö voi siis olla sekä taloudellisesti kannattavaa, että ympäristöystävällistä. Teollisuuden sivutuotteet, kuten esimerkiksi energiantuotannon tuhkat ja rautateollisuuden masuunikuona ovat yleisiä maarakennuksessa käytettäviä materiaaleja. Kuitenkin erityisesti teollisuuden tuhkia voitaisiin käyttää vielä tehokkaammin, ja ne ovat edelleen kaatopaikkoja merkittävästi kuormittava jäte. (Korpijärvi et al. 2009.) Kiviainesten kierrätyksen ja korvaavien materiaalien käytön yleistymistä hidastaa tuotekehitys, mutta myös lainsäädäntö, joka vaatii joidenkin materiaalien käytön osalta ympäristölupaa (Työ- ja elinkeinoministeriö 2015).

Vaikka teollisuuden sivutuotteiden käyttö on lisääntynyt maarakennuksessa, alalla on myös omia sivutuotteita, joiden käyttöä tulisi kehittää. Esimerkiksi kivituhka on hienoa kalliomursketta, jota syntyy kiviainestuotannon sivutuotteena. Kivituhkaa muodostuu tuotantoprosessin aikana, mutta myös silloin kun valmistetaan katkaistuja lajikkeita. Kivituhkaa ei luokitella jätteeksi, mutta kivituhkan korkea hienoainespitoisuus rajoittaa sen käyttöä maarakentamisessa. Korkea hienoainespitoisuus aiheuttaa routivuutta, minkä lisäksi hieno materiaali pölyää ja liettyy helposti. Mitä enemmän kivituhkassa on hienoainesta, sitä vaikeampi sitä on hyötykäyttää (Manning 2004). Kivituhkan käytettävyyteen vaikuttaa sen teknisten ominaisuuksien lisäksi myös tuotantopaikkojen ja käyttökohteiden etäisyys toisistaan. Kivituhkaa voidaan käyttää kohteissa, joissa routivuudella ei ole merkitystä, mutta nykyisten käyttökohteiden menekki on huomattavasti pienempi kuin syntyvän kivituhkan määrä.

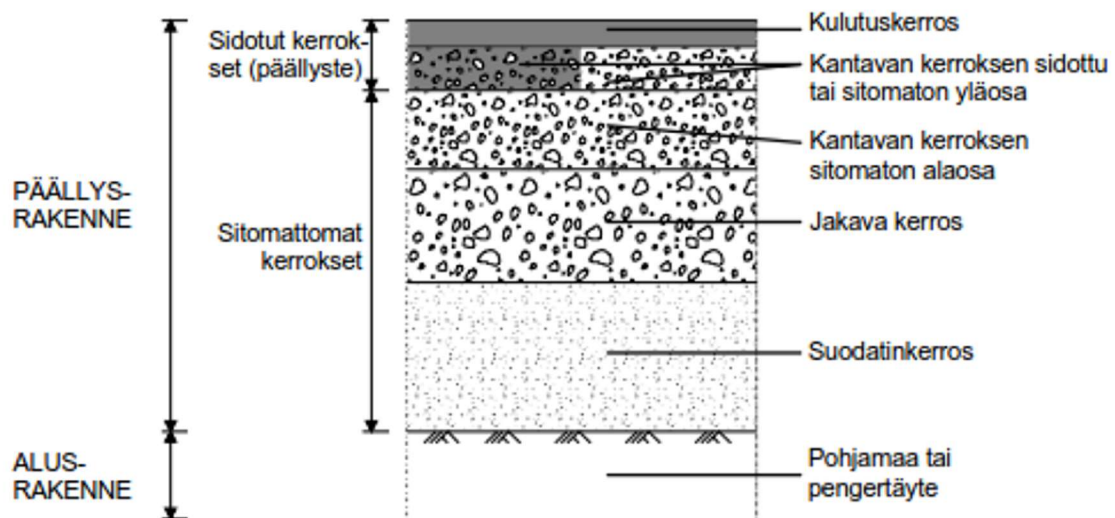
Tierakenteen tehtävä on taata turvallinen ja miellyttävä ajokokemus tien käyttäjälle. Kantavalla kerroksella on tärkeä tehtävä tien päällysrakenteessa lujuuden, kuormien jakamisen ja pysyvien muodonmuutosten vastustamisen kannalta. (Sævarsdóttir 2014.) Kantavalla kerroksella on kuitenkin taipumus hienontua vuosien myötä liikennekuormituksen vaikutuksesta. Hienoaineksen lisääntymisen myötä alun perin routimaton materiaali muuttuu routivaksi, rakenne väsyä ja menettää kantavuutensa. Stabilointi on hyvä tien parannuskeino kohteissa, joissa kantava kerros on hienontunut, sillä stabiloinnin sideaine sitoo hienoaineksen karkeammiksi rakeiksi parantaen kerroksen ominaisuuksia. Stabiloinnin avulla voidaan myös ottaa käyttöön huonompilaatuisia kiviaineita, joita ei voitaisi käyttää sellaisenaan tierakenteessa. (Tielaitos 2000.)

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia kivituhkan soveltuvuutta kantavan kerroksen stabiloinnin runkoaineeksi. Kivituhkan soveltuvuutta stabiloinnin runkoaineeksi tutkittiin laboratoriokokeiden avulla. Tutkimuksessa hyödynnetään Lemminkäinen Infra Oy:n vuonna 2013 tekemän tutkimuksen tuloksia, jossa havaittiin, että kivituhkan routivuutta voidaan vähentää lisäämällä kivituhkan sekaan lentotuhkaa. Diplomityöhön kuuluu kirjallisuusselvitys, jossa esitellään tien päällysrakenne, sen toiminta sekä suunnitteluperiaatteet. Lisäksi esitellään kerrosstabilointimenetelmät ja tutkimuksessa käytetyt materiaalit. Diplomityön kokeellisessa osassa tehtiin laboratoriokokeita erilaisille kokeellisille stabilointimassoille. Massat koostuivat kivituhkasta ja erilaisista hydraulisista sideaineista. Referenssimateriaalina käytettiin perinteistä stabilointimassaa, eli kalliomursketta ja sementtiä. Työssä ei tutkittu kivituhkan soveltuvuutta bitumi-, komposiitti- tai Remix-stabilointimenetelmiin. Työssä ei myöskään tarkasteltu runko- tai sideaineiden kemiallisia ominaisuuksia tai ympäristövaikutuksia. Työn tavoitteena oli tutkia, voidaanko kivituhkaa käyttää stabilointimassan runkoaineena alempiasteisella päällystetyllä tiellä. Työssä ei tutkittu päällystämättömiä tai pääväylien teitä.

2 Tien päällysrakenne

2.1 Tien rakennekerrokset

Tien päällysrakenteen tärkeimpiin tehtäviin kuuluu liikenteen aiheuttamien kuormien jakaminen pohjamaahan sekä ympäristön aiheuttamien jännityksien ja muodonmuutoksien vaimentaminen (Sævarsdóttir 2014). Tien päällysrakenne koostuu kerroksista, jotka ovat kulumakerros, kantava kerros ja jakava kerros. Suomessa rakennekerrokseen kuuluu usein myös suodatinkerros. Lisäksi tiehen voidaan lisätä kuivatus-, vahvistus-, eristys- tai erotuskerroksia. (Liikennevirasto 2016.) Tien päällysrakenne on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Tien päällyys- ja alusrakenne (Liikennevirasto 2016).

Kulumakerros voi olla sidottu tai sitomaton. Sidottu kulumakerros tehdään asfaltista, ja sitomaton sora- tai kalliomurskeesta. Kulumakerros on tien kerroksista jäykin ja jakaa liikenteen kuormia tehokkaimmin. Asfalttipäällyste myös estää veden pääsyä alempiin kerroksiin, mikä parantaa rakenteen kantavuutta. Lisäksi sileä ja tasainen päällyste parantaa tien ajomukavuutta sekä ulkonäköä. (Doré & Zubeck 2009.) Asfaltteja on useita erilaisia, ja sopiva päällyste valitaan hankekohtaisesti. Asfalttipäällysteiden vaatimukset määräytyvät Päällystealan neuvottelukunta ry:n julkaisun Asfalttinormit 2017 mukaisesti. Yleisiä asfaltteja ovat muun muassa asfalttibetoni AB ja kivimastikiasfaltti SMA. Sitomattomissa päällysteissä käytetään usein rakeisuuksia 0/11 ja 0/16. (InfraRYL 2017.)

Kantavan kerroksen tehtävä on jakaa liikenteen kuormia laajemmalle alueelle alempiin kerroksiin. Lisäksi se johtaa päällysteen läpi tulevia vesiä. Kantava kerros tehdään sora- tai kalliomurskeesta, ja sen jäykkyys riippuu kiviaineksen rakeisuudesta, karkeudesta ja muodosta. Kantava kerros voi olla myös sidottu, jolloin kiviaines on stabiloitu sideaineella, kuten esimerkiksi bitumilla tai sementillä. Stabiloinnilla voidaan parantaa kantavan kerroksen kantavuutta tai vähentää materiaalin kosteutta ja routivuutta. (Doré & Zubeck 2009.) Kantava kerros voi myös koostua useista kerroksista, joista osa voi olla sidottuja ja osa sitomattomia (Korkiala-Tanttu 2018). Kantava kerros voidaan rakentaa myös uusiomateriaalista, jolloin

uusiomateriaalin laatuvaatimukset määräytyvät soveltuvien osien luonnon kiviaineksille asetettujen laatuvaatimuksen mukaan. Kantavaan kerrokseen soveltuvia raekokoja ovat 0/32 ... 0/63. Kantavan kerroksen kiviaines ei saa olla rapautumisherkkää, ja sen tulee kestää jäädytys-sulatusrasitusta. (InfraRYL 2017.)

Jakava kerros on karkearakeisempi kuin kantava kerros, ja sen maksimiraekoko on 0/100. Normaalia suurempia rakeisuuksia, kuten esimerkiksi 0/90 ... 0/250, voidaan käyttää, jos siitä ei ole haittaa työnaikaisen liikenteen hoidolle tai valmiin kerroksen toiminnalle. (InfraRYL 2017.) Myös jakava kerros jakaa kuormia, mutta sen tehtäviin kuuluu myös kuivatus, sillä jakava kerros estää kosteuden siirtymistä pohjamaasta kantavaan kerrokseen katkaistamalla veden kapillaarisen nousun. Toisaalta jakava kerros myös johtaa kulutuskerroksen ja kantavan kerroksen läpi tulevat vedet pois rakenteesta. Lisäksi jakava kerros estää pohjamaan ja kantavan kerroksen maa- ja kiviaineksien sekoittumisen. Jakavan kerroksen tehtäviin kuuluu myös eristys, ja se estää pohjamaan routimista sekä vaimentaa routanousun vaikutuksia. (Doré & Zubeck 2009.) Jakava kerros rakennetaan sora- tai kalliomurskeesta tai uusiomateriaaleista. Uusiomateriaalien laatuvaatimuksina käytetään soveltuvien osien luonnon kiviaineksille asetettuja laatuvaatimuksia. Jakavan kerroksen kiviaines ei saa olla rapautumisherkkää ja sen tulee kestää jäädytys-sulatusrasitusta. (InfraRYL 2017.) Jakavaa kerrosta voidaan käyttää myös kiilauskerroksena louhetäytön päällä, jolloin sen rakeisuus riippuu louhetäytön lohkarakoista (Korkiala-Tanttu 2018).

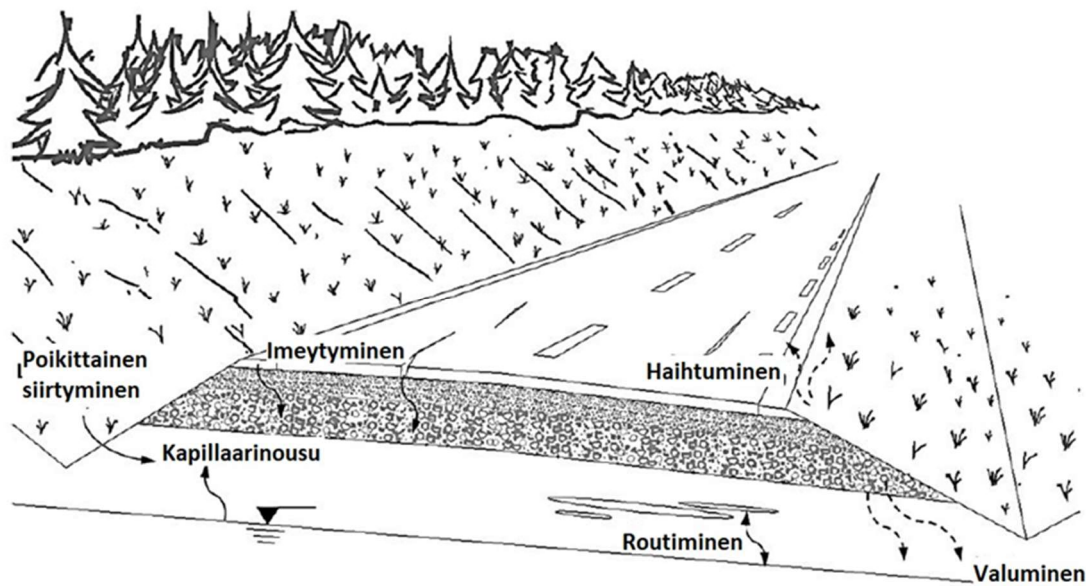
Suodatinkerroksella on samakaltaisia tehtäviä kuin jakavalla kerroksella, ja sen tehtävä on estää alusrakenteen ja jakavan kerroksen materiaalien sekoittuminen. Lisäksi suodatinkerros katkaisee veden kapillaarista nousua alusrakenteesta rakennekerrokseen, ja hidastaa roudan tunkeutumista pohjamaan. (Mäkelä & Höynälä 2000.) Suodatinkerroksen tarpeellisuus tierakenteissa arvioidaan jakavan kerroksen 2 mm seulan läpäisevän aineksen määrän perusteella. Suodatinkerros rakennetaan luonnonkiviaineksesta tai uusiomateriaalista. Materiaalin rakeisuuden tulee olla sellainen, että routimattomuus saavutetaan ja veden kapillaarinen nousu ei ylitä sallittua arvoa. Suodatinkerros voidaan tehdä esimerkiksi hiekasta. Tien päällysrakenteeseen voidaan tehdä suodatinrakenne myös suodatinkankaasta, joka erottaa alusrakenteen ja jakavan kerroksen materiaalit toisistaan. (InfraRYL 2017.) Suodatinrakenteella, joka on tehty suodatinkankaasta, ei kuitenkaan voida vähentää tien routimista.

Tien rakennekerrosten alla on tien alusrakenne. Vaikka alusrakenne ei kuulu tien rakennekerrokseen, sillä on suuri vaikutus tien päällysrakenteen toimintaan. Alusrakenne koostuu alkuperäisestä luonnonmateriaalista, täyttömateriaalista tai pohjavahvistetusta materiaalista, kuten esimerkiksi syvästabiloidusta maaperästä, ja sen laatu voi vaihdella tieosuudella merkittävästi. Heterogeenisyyden lisäksi ongelmia voi aiheuttaa se, että luonnonmateriaalista koostuvalla alusrakenteella on usein huono kantavuus ja se on altis kosteudelle sekä routimiselle. (Doré & Zubeck 2009.)

2.2 Kosteus, routivuus ja jännitykset tierakenteessa

Tierakenteessa on aina vettä vapaan veden, kapillaariveden, sidotun veden tai vesihöyryn muodossa. Vapaa vesi voi suurina määrinä aiheuttaa rakennekerrosten lujuuden alenemista. (Liikennevirasto 2016.) Tierakenne voidaan jakaa kosteuspitoisuuden perusteella kahteen osaan. Pohjavedenpinnan alapuolella on kyllästetty alue, jossa rakeisen materiaalin huokokset ovat täynnä vettä. Pohjavedenpinnan yläpuolella taas on kyllästämätön alue, jossa huokosten

kosteus vaihtuu kyllästetystä tilasta materiaalin luonnolliseen kosteuspitoisuuteen. Kyllästämättömällä alueella on kapillaarivyöhyke, jossa kapillaarivoimat vetävät pohjavettä ylöspäin. Kapillaarivyöhykkeen paksuus riippuu materiaalin rakeisuudesta, ja se voi vaihdella muutamasta senttimetristä muutamaa metriin. (Salour 2015.) Vettä voi siis siirtyä pohjamaasta tien rakennekerrokseen kapillaarivoimien vaikutuksesta. Vesi voi siirtyä maassa myös poikittain, jos ympäröivän alueen pohjavedenpinta on korkeammalla kuin tieosuuden pohjavedenpinta. Tällöin vettä siirtyy tien alle erisuuruisen vedenpaineen vaikutuksesta. Ympäröivän alueen pohjavedenpinta voi olla korkeammalla kuin tieosuuden pohjavedenpinta, jos tie on esimerkiksi rakennettu kaltevaan maastoon. Kapillaarisen nousun ja poikittaisen siirtymisen lisäksi vettä siirtyy tierakenteeseen imeytymällä päällysteen halkeamien tai pientareen kautta. (Doré & Zubeck 2009.) Veden liikkuminen tierakenteessa on esitetty kuvassa 2. Kosteuspitoisuuden muutokset eivät ole toivottavia, sillä ne voivat heikentää tierakenteen kantavuutta merkittävästi. Karkearakeisissa materiaaleissa kosteuspitoisuuden kasvu vähentää partikkelien välistä kitkaa, kun taas hienorakeisemmissa materiaaleissa kosteus vaikuttaa materiaalin jännitystilaan huokospaineiden kautta. (Salour 2015.)



Kuva 2. Veden liikkuminen tierakenteessa (Salour 2015, muokattu).

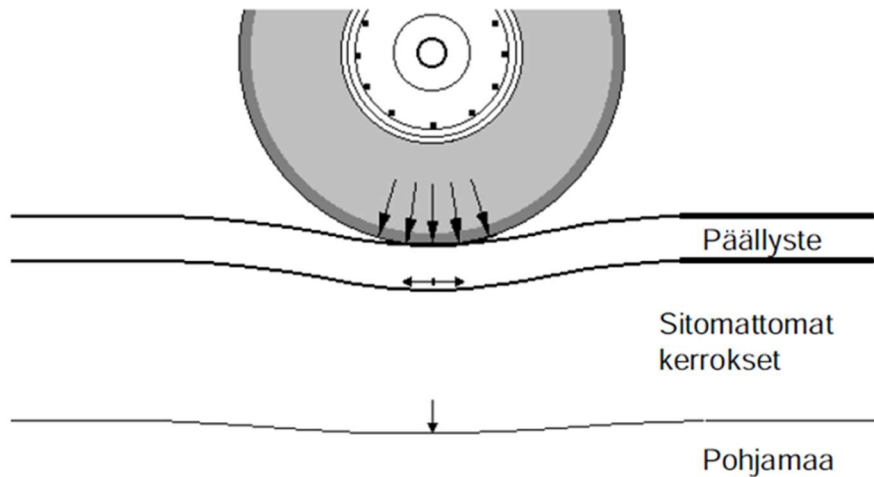
Routuminen on yksi merkittävimmistä kosteuden lähteistä tierakenteissa kylmillä alueilla (Salour 2015). Kun routa etenee tierakenteessa, maa-aineksen huokosissa oleva vesi jäätyy muodostaen jäälinsejä, jotka vetävät pohjavedestä lisää vettä jäätymisrintamaan. Kun jää sulaa keväällä, maa-aineksen vesipitoisuus on huomattavasti suurempi kuin ennen jäätymistä, mikä heikentää maa-aineksen lujuutta. (Doré & Zubeck 2009.) Sulaminen alkaa yleensä rakenteen yläosasta alaspäin, jolloin vesi pääsee poistumaan vain ylöspäin tai sivulle. Tämä hidastaa veden poistumista entisestään ja pitää pohjamaan huonosti kantavana pidempään. (Liikennevirasto 2016.) Lisäksi rakenteessa jäätyvä vesi laajenee aiheuttaen maa-aineksen löyhtymistä, mikä johtaa routanousuun. Mikäli routiva materiaali, esimerkiksi pohjamaa, on epätasalaatuista, myös routanousu on epätasaista, mikä johtaa epätasaiseen tien pintaan. (Thom 2008.) Kuitenkin myös tasainen routanousu voi aiheuttaa halkeamia, erityisesti kapeilla teillä (Liikennevirasto 2016). Routimisen edellytyksiä ovat riittävän alhainen lämpötila, riittävä vesipitoisuus ja routiva maa-aines. Maa-aineksen routivuutta voidaan arvioida sen rakeisuuden tai kapillaarisen nousun perusteella. (Tielaitos 1993.)

Tierakenteeseen kohdistuu staattisia ja syklisiä jännityksiä, ja ne voivat olla joko kuormituksen tai ympäristön aiheuttamia. Staattisia jännityksiä aiheuttavat muun muassa maan paine, staattiset liikennekuormat sekä maan pysyvät liikkeet, kuten esimerkiksi painuma. Syklisiä jännityksiä aiheuttavat liikkuvat liikennekuormat, lämpötilan vaihtelut, routanousu ja huokospaineen muutokset. (Doré & Zubeck 2009.) Tierakenteeseen kohdistuvat rasitukset on esitetty taulukossa 1. Kuormituskestävyyden kannalta merkittävin kuormitus on raskaan liikenteen aiheuttama rasitus. Ympäristön aiheuttamista kuormituksista merkittävimpiä taas ovat muuttuvat lämpötila- ja kosteusolot. Tierakenteessa vallitseva jännitystila on monimutkainen tien kerroksellisen rakenteen sekä liikkuvien kuormien takia. (Liikennevirasto 2016.) Staattisten jännityksien vaikutuksia tarkastellessa voidaan olettaa, että maa käyttäytyy elastisen materiaalimallin mukaan, kun taas syklisen jännityksien mallintamisessa käytetään viskoelastista tai viskoelastoplastista mallia. (Doré & Zubeck 2009.)

Taulukko 1. Tierakenteen rasitukset (Doré & Zubeck 2009, muokattu).

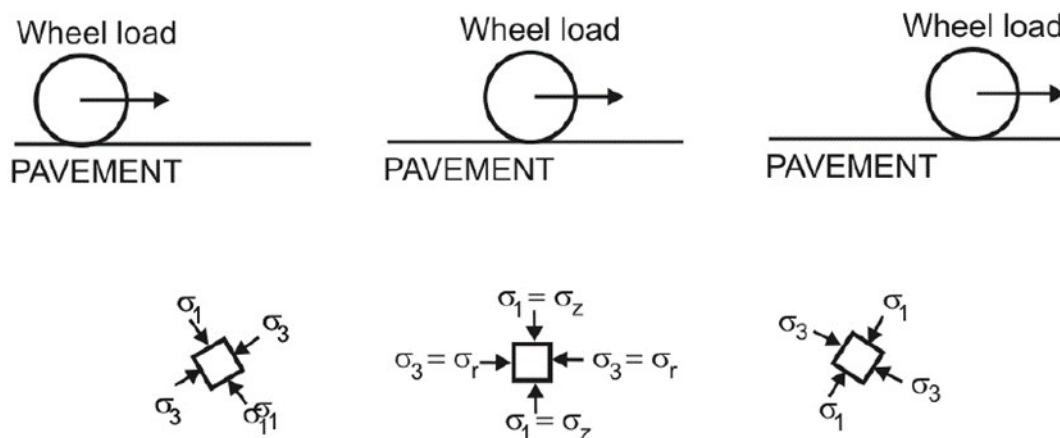
Staattiset jännitykset	Kuormituksen aiheuttamat	Maan lepopaine
		Staattiset liikennekuormat
	Ympäristön pitkäaikaisten ilmiöiden aiheuttamat	Pysyviin maan liikkeisiin liittyvät jännitykset
Sykliset jännitykset	Kuormituksen aiheuttamat	Liikkuvat liikennekuormat
	Ympäristön kausittaisten ilmiöiden aiheuttamat	Lämpökuormitus
		Routanousuun liittyvät jännitykset
		Huokospaine

Tierakenteen toiminnan kannalta on tärkeää millaisia muodonmuutoksia liikennekuormitus saa aikaan ja miten rakenne kestää muodonmuutoksia. Liikennekuormat jakautuvat päällysteen pinnalla pienelle pinta-alalle, mutta kun syvyys kasvaa, kuorma jakautuu suuremmalle pinta-alalle ja jännitys pienenee. Materiaalien laadulla on siis suuri merkitys erityisesti tierakenteen yläosassa, ja kantavalla sekä jakavalla kerroksella on merkittävä vaikutus rakenteen toimintaan. (Sævarsdóttir 2014.) Kerroksellisissa rakenteissa sidotun kerroksen alaosan vetojännitys ja pohjamaan yläosan puristusjännitys, jotka on esitetty kuvassa 3, ovat rakenteen toiminnan kannalta tärkeimmät tekijät. Jäykkä rakenne jakaa voimia paremmin, mikä pienentää pohjamaan puristusjännitystä. Toisaalta taas jäykkyyden kasvaessa myös sidotun kerroksen vetojännitys kasvaa. Sidottujen kerrosten jäykkyyden tulisikin olla sopivassa suhteessa sitomattomien kerrosten jäykkyyteen. (Liikennevirasto 2016.)



Kuva 3. Sidotun kerroksen alaosan vetojännitys ja pohjamaan yläosan puristusjännitys (Tammirinne 2002).

Tierakenne joutuu syklisen liikkuvan pyöräkuorman kuormittamaksi, mikä aiheuttaa muuttuvan jännityskentän sekä pysyviä ja palautuvia muodonmuutoksia. Kun ajoneuvon rengas lähestyy valittua tarkastelupistettä rakenteessa, suurin pääjännitys kääntyy vaakasuorasta pystysuoraksi. Kun rengas taas loittonee tarkastelupisteestä, niin pääjännitys kääntyy takaisin vaakasuoraksi. Pääjännitysten kiertymisellä, joka on esitetty kuvassa 4, on merkittävä vaikutus rakenteen pysyviin muodonmuutoksiin. Liikennekuormitusta vastaavissa kuormitustilanteissa palautuvaa muodonmuutosta tapahtuu kuitenkin palautumatonta enemmän, minkä lisäksi toistokuormitus vaikuttaa materiaalin jäykkyyteen. Ensimmäisestä syklistä aiheutuva palautumaton muodonmuutos on tavallisesti seuraavia suurempi, ja tietyn kuormitussyklimäärän jälkeen materiaalin jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen stabiloituu. Jännitys-muodonmuutuskäyttäytymiseltään stabiloitunut materiaali käyttäytyy lähes kimmoisesti. Stabiloitunut jännitys-muodonmuutossykli muodostaa hystereesisilmukan, josta voidaan määrittää materiaalin jäykkyyttä toistokuormitustilanteessa kuvaava resilient modulus eli jäykkyyshmoduuli. Jäykkyyshmoduuli on jännitysriippuvainen ja se kuvataan yleensä jännityksen funktiona. (Liikennevirasto 2016.)



Kuva 4. Pääjännitysten kiertyminen liikkuvan pyöräkuorman vaikutuksen alaisena (Korkiala-Tanttu 2008).

2.3 Tien päällysrakenteen suunnittelu

Tien päällysrakenteen keskeisiä mitoittavia tekijöitä ovat kuormituskestävyys, routakestävyys sekä pohjamaan geotekninen kantavuus. Pohjamaan geoteknisellä kantavuudella tarkoitetaan pohjamaan kantavuutta, kun sen päälle rakennetaan rakenne. Kantavuutta arvioidaan pohjamaan stabiliteetin, kokonaispainuman ja painumaerojen avulla. (Liikennevirasto 2016.) Kuormituskestävyysmitoitus määrittää eri kerrosten paksuudet, kun taas routamitoitus määrittää rakenteen kokonaispaksuuden. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös tien haluttu tai vaadittu palvelutaso, joka kuvaa tien kuntoa liikennöitävyyden kannalta. Palvelutasoon vaikuttavat muun muassa tien pituus- ja poikkisuuntainen tasaisuus, kaltevuuden muutokset sekä päällysteen pinnan ominaisuudet. Palvelutaso vaikuttaa liikenneturvallisuuteen, ajomukavuuteen, ajonopeuteen, lähistöllä asuvien melutasoon ja tienpitäjän kunnossapitokustannuksiin. (Tiehallinto 2004.) Myös kuivatuksen suunnittelu on tärkeää, sillä osa materiaalien mitoitusparametreista on kosteudesta riippuvia. Tien päällysrakenteen suunnittelu voi perustua joko kokemuseräiseen tai analyyttiseen menetelmään. (Liikennevirasto 2016.) Suomessa käytetään yleensä kokemuseräisiä menetelmiä (Kolisoja 1997).

Kuormituskestävyysmitoituksella tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa liikennekuormien aiheuttamia muodonmuutoksia ja jännityksiä. Mitoitus alkaa liikenteen aiheuttaman rasituksen määrittämisellä. Rasitusta kuvataan kuormituskertaluvulla, KKL, joka lasketaan keskimääräisen vuorokausiliikenteen ja tiellä liikkuvien ajoneuvotyyppien perusteella. Kuormituskertaluvun ja tien päällystetyypin avulla valitaan tien kuormitusluokka, joka määrittää tavoitekantavuuden päällysteen päällä, päällysteen vähimmäispaksuuden, tavoitekantavuuden kantavan kerroksen päällä sekä kantavan kerroksen laadun. Tavoitekantavuudet on määritetty kokemuseräisesti. Rakenteen kokonaispaksuus määräytyy usein routamitoituksen perusteella. Kokonaispaksuuden, tavoitekantavuuksien sekä päällysteen vähimmäispaksuuden avulla voidaan laskea rakenteen kerrosten paksuudet käyttäen Odemarkin kaavaa (1). (Tiehallinto 2004.) Kaavassa käytettävät materiaalien moduulit on esitetty Liikenneviraston julkaisussa Tierakenteen suunnittelu (2018). Esimerkiksi pohjamaan mitoitusominaisuudet ja kelpoisuusluokat valitaan taulukosta rakeisuuden, kosteusolosuhteiden ja tasalaatuisuuden mukaan.

$$E_P = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \cdot \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{E}{E_A}\right)^{\frac{2}{3}}}}} \quad (1)$$

jossa

E_A = mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus (MPa)

E_P = mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus (MPa)

E = mitoitettavan kerroksen materiaalin E – moduuli (MPa)

h = mitoitettavan kerroksen paksuus (m)

a = kuormittavan pyörän kosketuspinnan laskennallinen säde (0,15 m)

Odemarkin kaavan kanssa käytetään seuraavia lisäehtoja:

Lisäehto 1: Sitomattoman kerroksen käyttökelpoinen E-moduuli on enintään $6 \cdot E_A$ ja osittain sidottujen enintään $n \cdot E_A$. Kerroin n valitaan Tiehallinnon julkaisun Tietoa tiensuunnitteluun 71D (2005) mukaan.

Lisäehto 2: Yhteenliimautuneet, ehjät bitumilla sidotut kerrokset, joiden $E \geq 1500 \text{ MPa}$, lasketaan yhtenä kerroksena, jonka moduuliksi oletetaan osakerrosten moduulien paksuuksilla painotettu keskiarvo.

Odemarkin menetelmän haasteena on se, että siinä oletetaan jäykkyyden ja kestävyys korreloivan toisiaan. Tämä voi muodostua ongelmaksi hauraan ja jäykän kerroksen tapauksessa. (Liikennevirasto 2016.) Kokemusperäisten suunnittelumenetelmien haasteena on lisäksi se, että suunnittelumenetelmät, laskentakaavat ja materiaalien moduulit on kehitetty ja määritetty perinteisille kiviaineksille. Vaikka uusiomateriaalien ominaisuudet ovat suurelta osin verrattavissa perinteisten kiviaineksien ominaisuuksiin, eroakin löytyy. Merkittävimpiä eroja saattavat olla poikkeava rakeisuus sekä pinta- ja lujittumisominaisuudet. Perinteisillä suunnittelumenetelmillä ei siis välttämättä päästä todenmukaisiin tuloksiin uusiomateriaalien osalta. (Eerola 2001.) Kokemusperäisillä menetelmillä ei myöskään voida ottaa huomioon liikennekuormituksista rakenteen eri osiin aiheutuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia, eikä eri materiaalien erilaisia väsymiskestävyyskäyrä. Tavoitteena onkin siirtyä analyyttiseen mitoitusmenetelmään, jonka avulla edellä mainitut asiat voitaisiin ottaa huomioon. Analyyttinen mitoitus on kuitenkin perinteistä mitoitusta monimutkaisempi ja edellyttää tietokoneohjelman käyttöä. Suomessa yleisimmin käytetty analyyttinen mitoitusmenetelmä on Analyyttinen Päällysrakenteen suunnittelu, eli APAS-menetelmä. Menetelmän avulla rakenne saadaan suunniteltua niin, että kuormituskestävyyden kannalta kriittisimmät rasitukset, sidottujen kerrosten alapinnan vetomuodonmuutokset ja pohjamaanpinnan puristusjännitykset, jäävät riittävän alhaisiksi. (Tiehallinto 2002.)

Tien sallittu laskennallinen routanousu riippuu tien luokasta, rakenteen kestävydestä sekä pohjaolosuhteiden tasalaatuisuudesta. Tierakenteen laskennallinen routanousu lasketaan kaavoilla 2 ja 3. Kokonaan routimattoman tierakenteen laskennallinen routanousu lasketaan kaavalla 2, kun taas lievästi routivia materiaaleja sisältävän tien routanousu lasketaan kaavalla 3. (Tiehallinto 2004.) Mitoitusroutansyvyys ja pakkasmäärään vaikuttavat teiden lumipeitteisyys ja vuoden keskilämpötila (Liikennevirasto 2016). Routimista voidaan hallita kerrospaksuuksien lisäksi myös routaeristerakenteilla, jotka estävät lämmön siirtymisen päällysteen ja pohjamaan välillä. Eristerakenteiden käytössä on kuitenkin otettava huomioon, että estynyt lämmön siirtyminen lisää päällysteen jäätymisriskiä, mikä lisää liukkausriskiä. (Harju 2017.)

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 jne) \cdot \frac{t}{100} \quad (2)$$

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 - a_{rva} \cdot R_{rva} jne) \cdot \frac{t}{100} + R_{rva} \cdot \frac{t_{rva}}{100} \quad (3)$$

joissa

RN_{lask} = laskennallinen routanousu

S = mitoitusroutansyvyys (mm)

R_i = routimattoman kerroksen paksuus (mm)

a_i = materiaalin vastaavuus eristävyyskannalta

t = alusrakenteen routaturpoama (%)

R_{rva} = routivan kerroksen paksuus (mm)

a_{rva} = routivan kerrosmateriaalin vastaavuus eristävyyskannalta

t_{rva} = routivan kerrosmateriaalin routaturpoama (%)

Asfalttipäällysteen valintaan vaikuttavat päällystyskohteen sijainti, käyttötarkoitus sekä liikennemäärä. Suomessa käytettyjä asfalttityyppejä ovat asfalttibetoni (AB), pehmeä asfalttibetoni (PAB), kivimastiksiasfaltti (SMA), valuasfaltti (VA) ja avoin asfaltti (AA). Asfalttipäällysteen tärkeimmät ominaisuudet ovat kiviaineksen rakeisuus sekä massan sideainepitoisuus, ja Päällystealan Neuvottelukunnan julkaisussa Asfalttinormit 2017 onkin määrätty jokaiselle asfalttityypille kiviaineksen vaadittu rakeisuus sekä soveltua sideaine ja sideainepitoisuus. Sideainepitoisuuden ja rakeisuuden sallitut poikkeamat määräytyvät päällysteen laatuvaatimusluokan perusteella, joka riippuu tien nopeusrajoituksesta ja keskimääräisestä vuorokausiliikenteestä. (PANK 2017.) Vilkasliikenteisillä teillä käytetään paksuja, jäykkiä ja vesitiiviitä päällysteitä. Paksut ja jäykät päällysteet eivät deformoidu herkästi, jolloin ne suojaavat myös alempia kerroksia muodonmuutoksilta. Huono vedenläpäisevyys suojaa alempia kerroksia vedeltä, minkä parantaa erityisesti hydraulisesti sidottujen kerrosten toimintaa. Vaikka suunnittelun tavoitteena on, että päällyste säilyy ehjänä mahdollisimman pitkään, halkeamia ei kuitenkaan voi estää kokonaan. Tie olisi hyvä päällystää uudelleen ennen kuin halkeamia alkaa syntyä, jolloin rakenteen deformatiivisuus saadaan estettyä ja pituussuuntainen tasaisuus pysyy hyvänä. Vähäliikenteisillä teillä käytetään ohuita, helposti muokattavia ja vettäläpäiseviä päällysteitä. Toisin kuin vilkasliikenteisillä teillä, päällysteen annetaan halkeilla ennen kunnostusta. Halkeilu sallitaan, sillä ohuen päällysteen halkeilu ei huononna tierakenteen kestävyyttä merkittävästi. Tie päällystetään uudelleen vasta kun vauriot heikentävät ajomukavuutta huomattavasti. Koska päällyste on vettäläpäisevä, kantava kerros tulee suunnitella niin, että se kestää vettä. (Tiehallinto 2004.)

3 Kerrosstabilointi

3.1 Kerrosstabilointi

Kerrosstabilointi on tierakenteen parantamismenetelmä, jossa tien jakava tai kantava kerros sidotaan sideaineella, kuten esimerkiksi sementillä tai bitumilla. Stabiloinnissa käytetty sideaine vaikuttaa stabiloidun kerroksen ominaisuuksiin. Stabiloinnilla kasvatetaan kerroksen jäykkyyttä, minkä ansiosta kuormitus jakautuu laajemmalle alueelle ja pohjamaahan kohdistuvat pystysuorat jännitykset sekä taipumat pienenevät. Lisäksi stabilointi vähentää rakenteen kosteusherkkyyttä ja routivuutta. (Doré & Zubeck 2009.) Sidotut kerrokset eroavat sitomattomista rakeisista kerroksista erityisesti siinä, että ne voivat vastaanottaa myös vetojännityksiä, eivätkä vain puristusjännityksiä (Thom 2008). Rakennekerroksen suuri kantavuus ja jäykkyys eivät kuitenkaan takaa rakenteen toimivuutta, sillä jäykkyyden kasvattaminen lisää murtumisen riskiä. Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti kylmissä olosuhteissa, joissa rakenteen tulee kestää routanousun aiheuttamia deformaatioita sekä lämpötilanvaihdelun aiheuttamia tilavuuden muutoksia. (Doré & Zubeck 2009.)

Hydraulisilla sideaineilla, kuten esimerkiksi sementillä, saadaan jäykkiä rakenteita, joilla on hyvä kestävyys väsymistä vastaan. Bitumilla saadaan joustavampi rakenne, mutta toisaalta bitumilla sidottu kerros myös deformatuu helpommin. (Thom 2008.) Stabilointimenetelmän valinta perustuu laatuvaatimuksiin, käyttöolosuhteisiin, materiaalien toiminnallisiin ominaisuuksiin ja rakenteen käyttöikänsä sekä elinkaarikustannuksiin (Tiehallinto 2007 b). Stabilointi soveltuu sekä uusien teiden rakentamiseen että vanhojen teiden parannukseen (Tiehallinto 2007 a). Stabilointi on ympäristöystävällinen vaihtoehto, sillä vanhojen teiden parantamisessa vanha tierakenne käytetään kokonaisuudessaan hyödyksi ja uutta materiaalia tarvitaan vain vähän. Lisäksi myös uudiskohteissa voidaan ottaa hyötykäyttöön heikompilea- tuista kiviainesta, kun se stabiloidaan. (Tiehallinto 2007 b.) Stabilointi voi myös vähentää rakentamisen kustannuksia, kun paremman kantavuuden ansiosta voidaan valita ohuempi päällyste ja rakennekerrokset (Ramboll Finland Oy 2012).

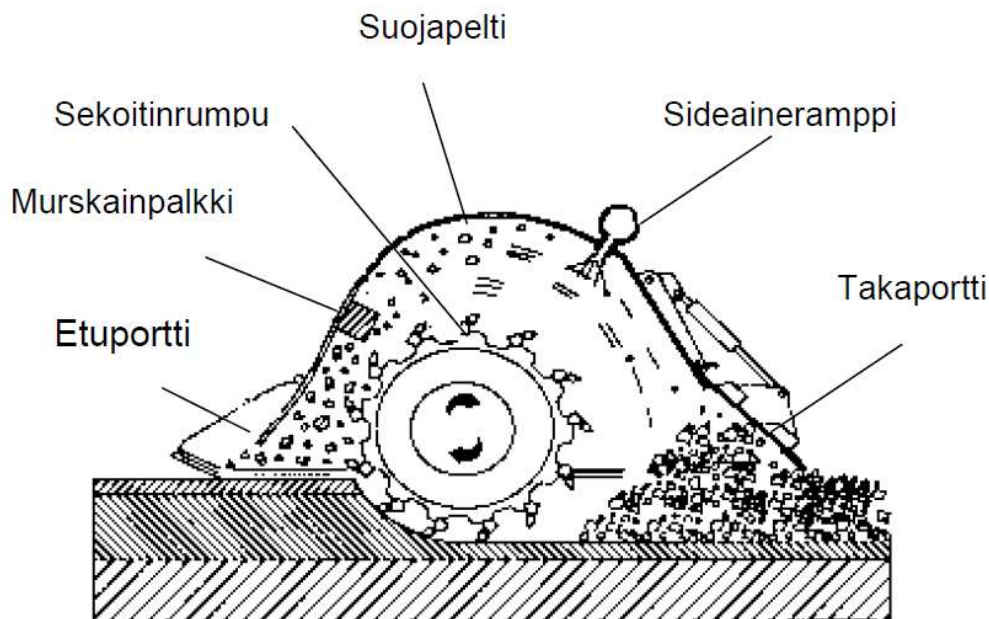
3.2 Sekoitusmenetelmät

Stabilointi voidaan tehdä paikallasekoitus- tai asemasekoitusmenetelmällä. Paikallasekoitusmenetelmässä sideaine sekoitetaan stabiloitavaan kerrokseen suoraan rakennuskohteessa, kun taas asemasekoitusmenetelmässä stabilointimassa valmistetaan sekoitusasemalla. (Tiehallinto 2007 b.) Suomessa paikallasekoitus on yleisempää kuin asemasekoitus (Tiehallinto 2002).

Paikallasekoitus alkaa usein esijyrsinnällä. Esijyrsinnässä vanha päällyste rouhitaan ja sekoitetaan kantavaan kerrokseen ennen varsinaista stabilointijyrsintää. Joissain tapauksissa voidaan jyrsiä osa vanhasta asfaltista uusiokäyttöön ennen esijyrsintää, jolloin vanha sideaine saadaan hyödynnettyä parhaiten. Jos kohteeseen tarvitaan lisäkiviainesta, se lisätään yleensä esijyrsinnän yhteydessä. Esijyrsinnän tehtävänä on valmistella tien taseus ja muoto halutuksi kantavan kerroksen rakentamista varten. Esijyrsinnällä voidaan vähentää materiaalien lajittumia, paksuusvaihteluja, kiviaineksen lisäystarvetta ja stabilointijyrsinnän jälkeistä muotoilutarvetta. Esijyrsintä tehdään aina vähintään kaksi senttimetriä stabilointijyr-

sintää syvemmälle, jotta jyrsimätön pohja ei aiheuta epätasaisuuksia stabiloitavaan kerrokseen. Esijyrsinän jälkeen pinta muotoillaan ja tiivistetään oikeaan muotoon, jotta massan siirtely stabilointijyrsinän jälkeen olisi mahdollisimman vähäistä. Stabiloitava materiaali voidaan tarvittaessa kastella ennen tiivistämistä, sillä runkoaineen sopiva kosteus on tärkeää sekä sideaineen sekoittumisen että massan tiivistämisen kannalta. Liian kuiva massa ei tiivisty kunnolla, kun taas liian kosteassa massassa vesi ja sideaine nousevat pintaan. Kastelun avulla runkoaine pyritään saamaan optimivesipitoisuuteen ennen stabilointijyrsinän aloittamista. (Tiehallinto 2002.)

Stabilointijyrsinä on aloitettava välittömästi kastelun jälkeen, sillä murskekerros pidättää vettä huonosti. Stabilointijyrsin jyrsii kiviaineksen, sekoittaa siihen sideaineen ja levittää valmiin massan kohteeseen tasaisena kerroksena. Sideaine voidaan joko levittää kuivalevitinillä stabilointijyrsinen eteen tai lisätä emulsiona stabilointijyrsinen rummun lävitse. Stabilointijyrsinen rumpu on esitetty kuvassa 5. Hydrauliset sideaineet levitetään usein kuivana, kun taas bitumit lisätään runkoaineeseen stabilointijyrsinen kautta. Työ tehdään yksi ajokaista kerrallaan siten, että ajoradan joka kohtaan tulee tasavahva stabiloitu kerros. Levittämisen jälkeen kerros tiivistetään välittömästi. Valmiin pinnan tulee olla tiivis, kiinteä, tasainen ja oikean muotoinen. Stabiloinnin lujuus lisääntyy tiivistyksen aikana, mutta lopullinen lujuus saavutetaan kuukausien päästä sideaineesta riippuen. Stabiloitu pinta voidaan avata liikenteelle, mutta nopeusrajoituksen tulee olla 50 km/h, jotta rakenne ei purkaudu. (Tiehallinto 2002.)



Kuva 5. Stabilointijyrsinen rumpu (Tiehallinto 2002).

Paikallasekoitusmenetelmä soveltuu erityisesti vanhojen teiden parantamiseen kohteissa, joissa tien tasausviivaa ei voida korottaa tai materiaaleja ei ole saatavilla lähialueelta (Tiehallinto 2002). Paikallasekoitusmenetelmässä stabiloinnin raaka-aineina käytetään pääasiassa vanhan tierakenteen materiaaleja, ja kohteeseen täytyy kuljettaa vain mahdolliset lisäsideaine ja -kiviaines (Tiehallinto 2007 b). Paikallasekoitusmenetelmää käytetään kuitenkin myös uusien teiden rakentamiseen. Uudisrakennuskohteessa uusi stabiloinnin runkoaine

levitetään ja tiivistetään kohteeseen ennen stabilointijyrsintää. (Tiehallinto 2002.) Ennen paikallasekoituksen aloittamista tulee varmistaa, ettei käsiteltävällä osuudella ole teräsverkkoja tai muita rakenteita, jotka voisivat vahingoittaa stabilointilaitteistoa (InfraRYL 2017). Paikallasekoitusmenetelmä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kerrostabilointi paikallasekoitusmenetelmällä (Ramboll Finland Oy 2012).

Sekoitusjyrsintä on paikallasekoitusmenetelmä, jota käytetään vanhan tien olemassa olevien materiaalien homogenisointiin. Sekoitusjyrsintää voidaan käyttää alustan homogenisointiseksi tai profiilin parantamiseksi, mutta sen aikana ei lisätä sideainetta. Tällöin vain sekoitetaan olemassa olevat materiaalit, minkä jälkeen rakenne tiivistetään. (Tiehallinto 2002.)

Asemasekoitusmenetelmässä runko- ja sideaine sekoitetaan massaksi sekoitusasemalla, josta se tuodaan rakennuskohteeseen (Tiehallinto 2007 b). Sekoitusasema on esitetty kuvassa 7. Asemasekoitusmenetelmää käytetään usein uusien teiden rakentamisessa. Asemasekoitusta voidaan käyttää myös vanhan tien parannusmenetelmänä, jos stabiloitava kerros koostuu uudesta kohteeseen lisättävästä materiaalista. Asemalla tehty massa kuljetetaan kohteeseen, jossa se levitetään asfalttilevittimellä tiivistetylle ja muotoillulle pinnalle. Lopuksi kerros tiivistetään. Asemasekoitusmenetelmällä voidaan taata homogeeninen stabilointimassa, sillä komponenttien annostelu on tarkempaa kuin paikallasekoitusmenetelmässä. Lisäksi asemasekoitusmenetelmällä voidaan tehdä monipuolisia stabilointimassoja. (Tiehallinto 2002.) Sekoitusasemalla voidaan tehdä myös pelkkä sideaineseos, joka sekoitetaan kiivaoksen kanssa rakennuskohteessa stabilointi- tai sekoitusjyrsimellä (Harju 2017).



Kuva 7. Sekoitusasema (Ramboll Finland Oy 2012).

Sekoitusmenetelmästä riippumatta stabilointityöt tulee tehdä sopivissa olosuhteissa, ja kiviaineksen lämpötila ei saa olla alle + 5 °C. Lisäksi stabilointityöt tulee keskeyttää sateella, jotta runkoaineksen kosteus ei kasva liian suureksi. (InfraRYL 2017.)

Taulukko 2. Paikalla- ja asemasekoitusmenetelmän ominaisuuksia (Tiehallinto 2002, muokattu).

Paikallasekoitusmenetelmä	Asemasekoitusmenetelmä
+ vanhojen materiaalien hyötykäyttö	+ kiviaineksen, rouheen ja sideaineen tarkka annostelu
+ ominaisuuksiltaan huonon kiviaineksen hyötykäyttö	+ homogeeninen ja tasalaatuinen massa
+ vähäinen lisäkiven kuljetustarve	+ voidaan käyttää ohuempaa kerrosta kuin paikallasekoituksessa
+ ei ole herkkä kiviaineksen / rouheen määrän vaihtelulle	+ rouhe voidaan lämmittää ja / tai elvyttää kuten kiviaineskin
- runko- ja sideaineen sekoittuminen ei yhtä tasalaatuista kuin asemasekoituksessa	- vanhoja materiaaleja ei pystytä hyödyntämään

3.3 Stabilointimenetelmät

Sementtistabiloinnissa (SST) sideaineena toimii sementti. Sementti on hydraulisesti sitoutuva materiaali, eli se tarvitsee vettä reagoidakseen. Veden ja sementin muodostama sementtiliima sitoo kiviaineksen rakeet toisiinsa kovettuessaan. Sementtistabilointimassan lujuus riippuu käytetystä sementtimäärästä ja vesi-sementtisuhteesta. (Tiehallinto 2002.) Tarvittava vesi- ja sementtimäärä määritetään tavoitelujuuden ja runkoaineen optimivesipitoisuuden sekä tavoitetiiveyden avulla, jotka määritetään ennen töiden aloitusta. Yleensä sementtiä käytetään kuitenkin 2,5-5 % stabilointimassan kuivapainosta (Tiehallinto 2007 b). Uudisrakentamisessa käytettävän kiviaineksen rakeisuus on usein 0/22 ... 0/32, kun taas vanhan kerroksen parantamisessa maksimiraekoko vaihtelee 0/32 ... 0/63. Stabilointimassan oikea vesipitoisuus on erittäin tärkeää massan lujuuden kannalta, joten stabiloitava kerros kastellaan optimivesipitoisuuteen ennen stabilointijärsintää. Vesi voidaan myös lisätä järsinnän aikana järsimen kautta. Sementtistabiloinnissa kerroksen tiivistys tulee suorittaa enintään kahden tunnin kuluttua massan valmistuksesta. (InfraRYL 2017.) Sementtistabiloinnin tavoitelujuudelle on ylä- ja alarajat, sillä liian luja sementtistabilointi halkeilee hallitsemattomasti. Jäykän kerroksen halkeilu voi johtua kovettumisen yhteydessä tapahtuvasta kutistumishalkeilusta, lämpötilaerojen aiheuttamista jännityksistä tai liikennekuormien aiheuttamista taivutus-vetojännityksistä. Sementtistabiloituun kerrokseen muodostuneet halkeamat voivat heijastua päällysteeseen, mikä huonontaa ajomukavuutta. Lisäksi vesi pääsee rakenteeseen halkeamien kautta. Muodostuvat halkeamat ovat kuitenkin pieniä, jos kerroksen lujuus on kohtuullinen ja paksuus on tarpeeksi suuri. Pienet halkeamat eivät heijastu päällysteen pintaan, eivätkä siten aiheuta suurta haittaa rakenteen toimivuudelle. (Tiehallinto 2002, Tielaitos 1997.) Hydraulista sideainetta käytettäessä stabiloitu pinta on suojattava bitumiemulsiokerroksella tai päällystettävä heti stabilointityön jälkeen. Pinta voidaan myös pitää kosteana päällystämiseen saakka. Näin voidaan välttää kutistumahalkeamia. (Tiehallinto 2002.) Koska sementtistabiloitu kerros voi rapautua suolaveden tai jäädytys-sulatussykliä takia, veden pääsy kerrokseen tulisi estää. Tämän takia hyvin vettä läpäisevät päällysteet, kuten esimerkiksi kivimastiksiasfaltti SMA, eivät sovellu käytettäväksi sementtistabiloinnin kanssa. Jos käytetään kahta päällystekerrosta, ylempi kerros voi olla kivimastiksiasfalttia, kunhan alempi kerros on tiivis. (Tielaitos 1997.) Sementtistabilointi soveltuu hyvin uusille routimattomiksi rakennetuille teille, kohteisiin, joissa tarvitaan suurta kantavuutta ja kuormituskestävyyttä sekä kohteisiin, joissa tarvitaan ohuet rakennekerrokset. Sementtistabilointi ei kuitenkaan sovi kohteisiin, joissa epätasainen routanousu tai painumat ovat todennäköisiä. (Tiehallinto 2002.) Kuvassa 8 on esitetty sementtistabiloitu koekappale.



Kuva 8. Sementtistabiloitu koekappale (Melander 2018).

Bitumistabiloinnissa (BST) sideaineena käytetään bitumia. Bitumistabilointi voidaan tehdä vaahtobitumistabilointina (VBST), bitumiemulsiostabilointina (BEST) tai Remix-stabilointina (REST). (Tiehallinto 2002.) Vanhaa rakennetta hyödynnettäessä vaahtobitumi- ja bitumiemulsiostabiloinnissa vanha asfalttipäällyste esijyrsitään alle 50 mm:n rakeiksi. (InfraRYL 2017.) Vaahtobitumi- ja bitumiemulsiostabilointi voidaan tehdä joko paikallasekoituksena tai asemasekoituksena, kun taas Remix-stabilointi tehdään aina paikallasekoituksena. Vaahtobitumi- ja bitumiemulsiostabiloinnissa bitumin kokonaispitoisuus, eli lisätty ja mahdollinen vanha bitumi, on yleensä 3-4,5 % stabiloinnin kuivapainosta. Remix-stabiloinnissa bitumin kokonaispitoisuus on yleensä 2,5-3,5 %. (Tiehallinto 2007 b.) Bitumistabilointi soveltuu hyvin kohteisiin, joissa rakenteen routakestävyyttä halutaan parantaa ja/tai kohteessa esiintyy epätasaisia routanousuja. Bitumistabilointi on kannattavaa myös silloin, kun kohde halutaan nopeasti liikenteelle tai halutaan parantaa lyhyitä tieosuuksia. Bitumistabiloinnilla ei kuitenkaan saavuteta yhtä hyviä kuormituskestävyyksiä kuin sementtistabiloinnilla. (Tiehallinto 2002.)

Vaahtobitumistabiloinnissa bitumi vaahtotetaan vedellä. Bitumi vaahtoutuu, kun kuumaan bitumiin sekoitetaan vettä ylipaineessa, minkä jälkeen seoksen annetaan purkautua alempaan paineeseen. Paineen purkautuessa vesi höyrystyy nopeasti, minkä aiheuttaa bitumin vaahtoutumisen kasvattaen bitumin tilavuutta huomattavasti alkuperäiseen tilavuuteen verrattuna. Vaahtotetun bitumin tilavuus alkaa kuitenkin pienentyä nopeasti vesihöyryn poistuttua, ja vaahton maksimitilavuus puoliintuu noin 25 sekunnissa. Vaahto ja runkoaine tulee sekoittaa tänä aikana, jotta mahdollisimman suuri pinta-ala saadaan hyödynnettyä. Vaahtotettu bitumi sitoo hienoaineksen, kun se sekoitetaan kylmään ja kosteaan kiviainekseen. Vaahtobitumistabiloinnille tärkeitä ominaisuuksia ovat tilavuuden laajenemiskerroin, joka

kertoo vaahdon tilavuuden suhteen alkuperäiseen tilavuuteen, ja puoliintumisaika, joka kertoo maksimitilavuuden puoliintumiseen kuluvan ajan. 2-3 painoprosentin veden lisäys vastaa tilavuuden laajenemiskerrointa 15-20. Tärkein ominaisuus bitumin vaahtoutumisen kannalta on kuitenkin bitumin lämpötila. Lämpötilan tulee olla $\geq 140\text{ °C}$, jotta vaahtoutuminen on tehokasta. (Tiehallinto 2002.) Vaahtobitumistabilointimassan kanssa tulee käyttää tartutetta (Tiehallinto 2007 a).

Bitumiemulsiostabiloinnissa bitumi on seoksena veden kanssa. Koska bitumi ja vesi eivät sekoitu toisiinsa, bitumi on jakautunut pieniksi pisaroiksi veteen. Emulsio valmistetaan emulgoimalla bitumi veteen emulgaattorin avulla, jonka tehtävä on pitää bitumihiukkaset erillään toisistaan. Kun emulsio sekoitetaan kylmään ja kosteaan kiviainekseen, emulsio murtuu ja vesi erottuu bitumista. Irtonaiset bitumipisarot tarttuvat kiviaineksen rakeisiin ja toisiinsa muodostaen sidoksia. Bitumiemulsiostabilointia käytettäessä tulee varmistua emulsion ja kiviaineksen tarttuvuudesta sekä oikeasta murtumishetkestä. Emulsio saattaa murtua ennen aikaisesti esimerkiksi pumppauksen tai lämmityksen yhteydessä. Emulsio ei saa myöskään joutua pakkaseen, sillä veden jäätyessä emulsio pilaantuu käyttökelvottomaksi. (Tiehallinto 2002.)

Remix-stabilointia käytetään erityisesti vanhojen teiden parannusmenetelmänä, ja sen sideaineena on bitumiemulsio. Remix-stabiloinnilla voidaan kuitenkin tehdä myös uudisrakenteita. Remix-stabilointi alkaa vanhan päällysteen lämmittämällä, minkä jälkeen vanha päällyste ja kantavan kerroksen yläosa jyrstitään. Jyrstetty vanha materiaali ohjataan sekoittimeen, jossa se homogenisoidaan ja sen sekaan lisätään uutta kiviainesta ja bitumiemulsiota tarvittava määrä. Sekoitus tehdään menetelmää varten rakennetulla jatkuvatoimisella sekoittimella. Homogenisoitu massa levitetään sekoittimen takaosasta takaisin tielle, minkä jälkeen se tiivistetään. Lisäkiviaines voidaan joko levittää lämmittetylle vanhalle alustalle tai syöttää suoraan sekoittimen kautta, kun taas bitumiemulsio ruiskutetaan jyrsinrummulle ja sekoittimeen. (Tiehallinto 2002.) Remix-stabiloinnille sallittu alhaisin ilman lämpötila on 0 °C ja alhaisin massan lämpötila on $+30 \dots 50\text{ °C}$ asfalttipäällysteestä riippuen (InfraRYL 2017). Remix-stabiloinnilla saavutetaan hyvä materiaalien sekoittuminen, minkä lisäksi kosteuden vaihtelujen vaikutus stabiloidun rakenteen jäykkyyteen on vähäinen. Remix-stabilointi soveltuu erityisen hyvin kohteisiin, joissa on ohut asfalttipäällyste ja sen alla hienontunut kantava kerros. (Tiehallinto 2002.)

Sementin kaltaisella kovalla sideaineella saadaan rakenteelle hyvä kuormituskestävyys ja kestoikä, mutta jäykät kerrokset halkeilevat helposti. Erityisesti kylmissä olosuhteissa liian jäykkä kerros vaurioituu helposti. Bitumin kaltaisella pehmeällä sideaineella saadaan joustava rakenne ja hyvä kestävyys epätasaisia muodonmuutoksia vastaan, mutta ne eivät pysty vastustamaan deformaatiota yhtä hyvin kuin kovat sideaineet. Komposiittistabiloinnilla (KOST) pyritään yhdistämään erilaisten sideaineiden hyvät ominaisuudet, ja siinä käytetään kahta tai useampaa sideainetta. Suomessa komposiittistabiloinnin sideaineina käytetään usein sementtiä ja bitumia, joka voi olla vaahdotettua tai emulgoitua. (Tiehallinto 2002.) Bitumin kokonaispitoisuus on komposiittistabiloinnissa yleensä välillä 2,5-3,5 %, kun taas sementtiä on noin kolmasosa bitumin määrästä (Tiehallinto 2007 b). Komposiittistabilointi voidaan tehdä paikallasekoituksena tai asemasekoituksena. Paikallasekoituksessa hydraulinen sideaine levitetään erijyrstitylle pinnalle, minkä jälkeen bitumi lisätään vaahtobitumi- tai bitumiemulsiostabilointimenetelmällä. Asemasekoituksessa massat valmistetaan asemalla, jossa on syöttölaitteet hydrauliselle sideaineelle, bitumille, vedelle ja rouheelle, minkä jälkeen massa levitetään kohteeseen asfaltinlevittimellä. Koska massassa käytetään hydraulista

sideainetta, massa tulee levittää ja tiivistää kahden tunnin kuluessa massan sekoittamisesta. (InfraRYL 2017.) Komposiittistabilointi soveltuu hyvin kohteisiin, joissa tarvitaan sekä lujuutta että joustavuutta. Lisäksi komposiittistabiloinnilla saavutetaan nopeasti päällystystyöhön tarvittava alkulujuus, joten se soveltuu myös kohteisiin, joissa päällyste tulee saada mahdollisimman nopeasti levitettyä. (Tiehallinto 2002.) Komposiittistabilointia käytetään paljon Virossa (Korkiala-Tanttu 2018).

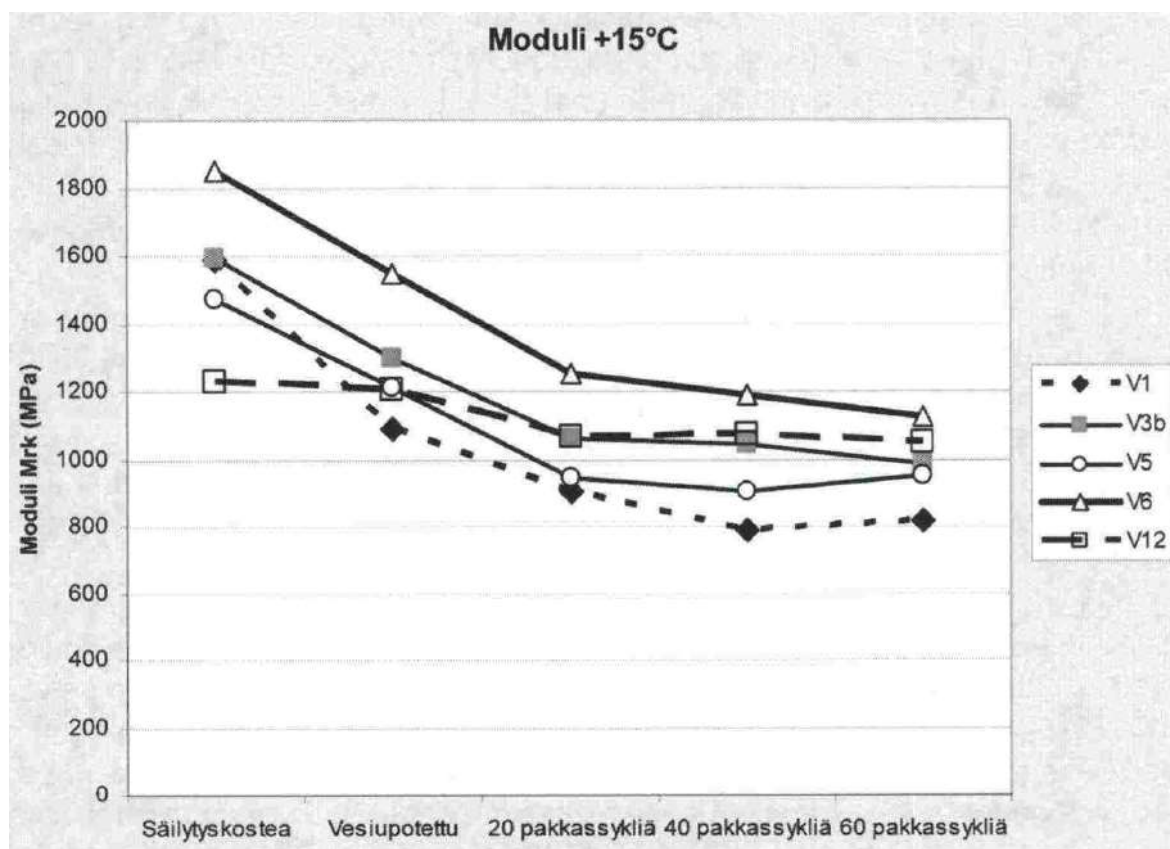
Masuunihiekkastabiloinnissa (MHST) sideaineena käytetään masuunihiekkaa, joka on rauta- ja terästeollisuuden sivutuote. Masuunihiekan kemiallinen koostumus on samantapainen kuin sementillä, ja myös sen sitoutumisreaktio on hydraulinen. Masuunihiekan sitoutumisreaktio on kuitenkin huomattavasti hitaampi kuin sementin, ja sementtiä käytetäänkin joskus masuunihiekkastabiloinnissa masuunihiekan aktivaattorina, joka nopeuttaa sitoutumista. Toisaalta masuunihiekan hidas sitoutumisreaktio voi olla myös hyödyksi, ja se mahdollistaa muun muassa pidemmän työaajan. (Tiehallinto 2002.) Yleensä masuunihiekkaa käytetään 4-15 % stabilointimassan kuivapainosta aktivaattorin määrästä riippuen (Tiehallinto 2007 b). Masuunihiekkastabilointi tulee tehdä elokuun loppuun mennessä, jotta massa ehtii lujittua pakkasenkestäväksi ennen talvea, ja stabilointityö tehdään yleensä paikallasekoituksena. Masuunihiekkastabiloinnissa esijysrity kerros kastellaan optimivesipitoisuuteen ja masuunikuona sekä mahdollinen aktivaattori levitetään käsiteltävälle alueelle ennen sekoitusjysyntää. (InfraRYL 2017.) Masuunihiekalla stabiloitua kerrosta voidaan pitää puolijäykkänä kerroksena, jonka kuormituskäyttäytyminen poikkeaa bitumilla ja sementillä sidottujen kerrosten käyttäytymisestä (Tielaitos 2000). Sideaineen ja aktivaattorin määriä suunniteltaessa on huomioitava, että vähäiselläkin aktivaattorin lisäyksellä on merkittävä vaikutus 28d puristuslujuuteen, kun taas masuunihiekan lisäämisen vaikutukset ilmenevät huomattavasti hitaammin. Masuunihiekkastabilointi soveltuu kohteisiin, joissa tarvitaan pitkää työaikaa ja hyvää kantavuutta. Lisäksi masuunihiekkastabilointia voidaan käyttää alueilla, joilla esiintyy lievää routanousua. (Tiehallinto 2002.)

3.4 Stabiloinnin suunnittelu

Stabilointimassan koostumuksen suunnittelua kutsutaan suhteitukseksi, ja se voidaan tehdä kokemusperäisen tai kokeellisen menetelmän mukaan (Tiehallinto 2007 b). Kokemusperäistä suhteitusta voidaan käyttää ainoastaan bitumistabilointimenetelmille, kun taas muiden stabilointimenetelmien kanssa on käytettävä kokeellista menetelmää. Kokeellisessa suhteituksessa valitaan ensin kohteessa käytetyt materiaalit saatavuuden ja materiaalien ominaisuuksien perusteella. Valituista materiaaleista valmistetaan laboratoriossa koekappaleita, joiden avulla määritetään eri massojen keskeiset ominaisuudet. Tutkittavia ominaisuuksia ovat lujuus, pakkasrapautumiskestävyys, routimisherkyys, vedenimeytyminen sekä tiivistävyys. (Harju 2017.)

Maastonäytteistä tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella on havaittu, että koekappaleiden valmistuksessa tärkeimpiä ominaisuuksia ovat tiiveys ja kosteus. Laboratoriokokeiden avulla määritetyt jäykkyysmoduulit usein ovat korkeampia kuin takaisinlasketut arvot. Mitoituksessa on käytettävä edustavia parametreja, sillä liian optimistiset jäykkyysarvot johtavat epärealistisiin kuormituskertalukuihin. Myös kosteudella ja jäädytys-sulatussykleillä on merkittävä vaikutus jäykkyysmoduuliin ja deformaatiokestävyyteen, joten laboratoriossa määritettävät mitoitusparametrit tulisi määrittää myös jäädytys-sulatussykliä jälkeen. Mer-

kittävin muutos parametreissa tapahtuu useimmiten ensimmäisen 20 syklin aikana. (Tiehallinto 2007 a.) Kosteustilan ja jäädytys-sulatussykliä vaikutus materiaalin jäykkyysmoduuliin on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Jäykkyysmoduulin riippuvuus kosteustilasta ja pakkasrasituksen määrästä (Tiehallinto 2007 a).

Stabiloidun rakenteen kantavuus- ja routamitoitukseen käytetään yleensä samaa menetelmää kuin sitomattomien kerrosten suunnitteluun, eli Odemarkin menetelmää. (Tiehallinto 2002.) Masuunihiekkastabiloitua kerrosta tarkastellaan puolijäykkänä kerroksena, ja sen käyttäytyminen poikkeaa sementti- ja bitumistabiloitujen kerrosten käyttäytymisestä. Masuunihiekkastabiloinnille ei voida tämän takia soveltaa jäykille kerroksille käytettyjä kestävyyskriteerejä, joissa tärkein ominaisuus on sidotun kerroksen alapinnan vetojännitys. Masuunihiekalla sidotun kerroksen kantavuusmitoitus tehdään sitomattomien kerrosten mitoituksen mukaan. (Tielaitos 2000.)

Sidottujen kerrosten suunnittelussa on otettava huomioon myös sidotun kerroksen tartunta ja kuivatus. Yleisesti käytetyt mitoituskäsitteet ovat, että sidotun ja sitomattoman kerroksen välillä on kitkaa, joten kerroksien on liimaannuttava toisiinsa, jotta rakenne toimisi suunnitellusti. (Tiehallinto 2004.) Kuivatus tulee ottaa huomioon muun muassa päällysteen valinnassa, sillä vettä läpäisemättömän sidotun kerroksen päälle voi syntyä talvella jäälinssiä, jos sen päällä on vettä läpäisevä päällyste. Kerrosten väliin muodostuvat jäälinssit voivat rikkoa niiden välisen tartunnan, minkä lisäksi suolapitoinen vesi rapauttaa hydraulisesti sidottua stabilointimassaa. Rapautunut stabilointimassa murenee, minkä seurauksena kerros voi muuttua routivaksi. Hydraulisesti sidottujen kerrosten kanssa onkin käytettävä vähintään yhtä vesitiivistä päällystekerrosta. (Liikennevirasto 2018.)

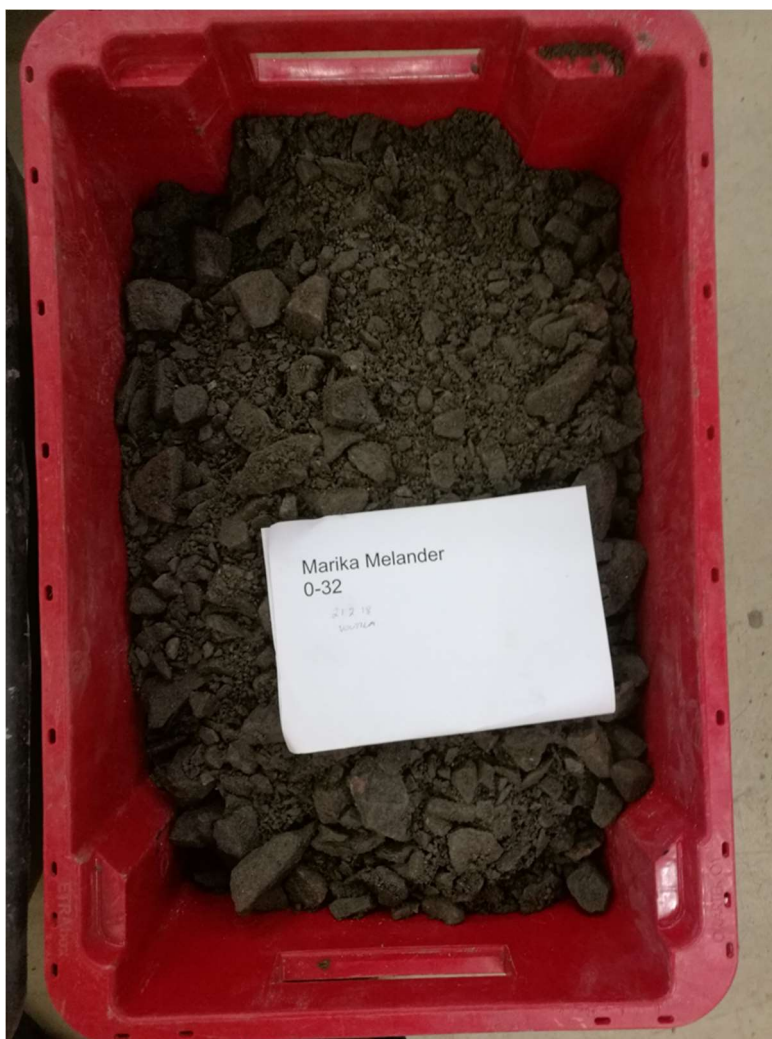
4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit

4.1 Kalliomurske

Kalliomurske on kalliosta irrotettua ja murskattua kiviainesta. Kalliomurskeesta käytetään lyhennettä KaM, ja sillä on minimi ja maksimiraekoko. Esimerkiksi kalliomurske, jonka minimiraekoko on 0 mm ja maksimiraekoko on 16 mm, merkitään KaM 0/16. Kalliomurskeita, joiden minimiraekoko on muu kuin 0 mm, kutsutaan sepeliksi tai katkaistuiksi lajikkeiksi. Esimerkiksi KaM 6/8 on sepeliä. Kalliomurskeen tärkeimmät ominaisuudet lujuuden kannalta ovat rakeiden muoto ja karkeus sekä rakeisuus. Käytettävä maksimiraekoko määräytyy rakennettavan kerroksen mukaan, sillä jyräys on tehokasta vain 250 mm syvyyteen ja tiivistäminen on vaikeaa, jos kiviaineksessa on liian suuria rakeita kerroksen paksuuteen verrattuna. Murskeen lujuus ei määräydy yksittäisten rakeiden perusteella, vaan kerroksen käyttäytyminen määräytyy rakeiden vuorovaikutuksen perusteella. Kulmikkaat ja karkeat rakeet lukkiutuvat toisiinsa paremmin kuin pyöreät, joten murskeella saavutetaan parempi lujuus kuin soralla. Murskeen rakeisuus ja rakeiden ominaisuudet riippuvat murskattavasta kivistä, mutta myös murskausmenetelmästä ja -laitteistosta. (Thom 2008.) Tässä tutkimuksessa käytettiin KaM 0/32 mursketta YIT Infra Oy:n Voutilan murskaamolta. Murskeen ominaisuuksia on esitetty taulukossa 3 ja ulkonäkö kuvassa 10.

Taulukko 3. Kalliomurske 0/32, Voutila (Lemminkäinen Infra Oy 2017).

Ominaisuus	Suoritustaso (SFS-EN 13242 + A1)
Raekoko	0/32
Rakeisuus	$G_A 85$, $GT_A 20$
Raemuoto	FI_{35}
Kiintotiheys	2,80 Mg/m ³
Vedenimeytyminen	0,30 %
Hienoaainespitoisuus	f_3
Murtopintaisten rakeiden osuus	NPD
Iskunkestävyys	LA_{20}
Koostumus	Kiviaines on pääosin hienorakeista tummaa liusketta, joka koostuu särmikkäistä kivilajifragmenteista. Tumma liuske 79 %, vaaleanharmaa kvartsi-maasälpäliuske 19 %, vaalea pegmatiitti 2 %.
Happoliukoiset sulfaatit Kokonaisriikki	AS_{NR} Hyväksytty S < 1 %
Jäädytys-sulatuskestävyys	Hyväksytty $WA_{24} 1$



Kuva 10. Kalliomurske 0/32, Voutila (Melander 2018).

4.2 Kivituhka

Kivituhka on hienoa kalliomursketta, jota syntyy kiviainestuotannon sivutuotteena. Kivituhkaa muodostuu tuotantoprosessin aikana, mutta myös silloin kun valmistetaan katkaistuja lajikkeita, kuten esimerkiksi KaM 8/16. Katkaistuja lajikkeita tuotetaan pääasiassa asfaltin ja betonin tuotannon tarpeisiin. Suomessa yleisimmin tuotetut kivituhkalajikkeet ovat 0/2, 0/3 ja 0/6. (Rasimus 2014.) Kivituhkaa ei luokitella jätteeksi, mutta kivituhkan korkea hienoainespitoisuus rajoittaa sen käyttöä maarakentamisessa routivuuden vuoksi. Kivituhkan käytettävyyteen vaikuttaa sen teknisten ominaisuuksien lisäksi myös tuotantopaikkojen ja käyttökohteiden etäisyys toisistaan.

Hienoainesta syntyy kivien hankautuessa toisiinsa, ja sitä muodostuu kiviaineksen louhinnan, murskauksen sekä kuljetuksen aikana. Louhintatavasta riippuen louhitusta materiaalista jopa 20 % voi olla hienoainesta. Kuitenkin valtaosa hienoaineksesta ja kivituhkasta syntyy murskauksen aikana. Syntyvän hienoaineksen määrään vaikuttaa murskausprosessi, jalostettavan kiviaineksen geologiset ominaisuudet sekä lopputuotteen rakeisuus. Iskumurskaimet tuottavat 20-30 % enemmän hienoainesta kuin puristusmurskaimet, sillä iskumurskaus

perustuu kivien väliseen kontaktiin, kun taas puristusmurskauksessa kiviaines rikkoutuu metallia vasten. (Mitchell 2009.) Yhdellä murskauksella saavutetaan harvoin haluttua raekokoa, ja murskaus tehdään usein useassa vaiheessa, mikä kasvattaa syntyvän hienoaineksen kokonaismäärää (Manning 2004). Eniten hienoainesta syntyy loppuvaiheen murskauksessa. Karkeiden kiviaineksien ja kovien mineraalien käsittely tuottaa vähemmän hienoainesta kuin hienojen kiviaineksien ja pehmeiden mineraalien käsittely. Maksimiraekooltaan 40 mm murskeen valmistus tuottaa 5-10 % hienoainesta, kun taas maksimiraekooltaan 10 mm murskeelle vastaava luku on 35-40 %. (Mitchell et al. 2008.)

Kivituhkaa käytetään Suomessa lähinnä kohteissa, jossa materiaalin routivuudella ei ole merkitystä. Kivituhkaa on mahdollista käyttää esimerkiksi kiveyksien asennushiekkana, kunnallistekniikan kaivantojen asennus- ja ympäristäytymateriaalina tai luiskatäytöissä. (Pitkänen 2015.) Kivituhkaa hyödynnetään myös pihapäälylysteinä sekä viherrakentamisessa kulutuskerroksen materiaalina (Rasimus 2014). Lisäksi kivituhkaa voidaan hyödyntää ratsastuskenttien pohjien materiaalina tai kompostin jälkikypsytyksessä (Jarva 2011, Wassholm 2008). Kivituhkaa muodostuu kuitenkin huomattavasti enemmän kuin mitä sitä voidaan hyötykäyttää, mikä aiheuttaa ongelmia muun muassa varastoinnin kannalta. Kivituhkan määrä Lemminkäinen Infra Oy:ssä vuosina 2016 ja 2017 on esitetty taulukossa 4.

Kivituhkan ylijäämä ei ole ongelma ainoastaan Suomessa, vaan myös muun muassa Isossa-Britanniassa ja Yhdysvalloissa on tutkittu hienon kiviaineksen muodostumista ja hyödyntämismahdollisuuksia. Tutkimusten mukaan yleisiä käyttökohteita olivat asfaltin tuotanto, jossa hienoa kiviainesta käytetään fillerinä, sekä tehdasvalmisteisen hiekan valmistus. Kivituhkan käytön yleistymistä hidastaa kuitenkin edellä mainittujen asioiden lisäksi epävarmuus materiaalin ominaisuuksista ja tasalaatuisuudesta. (Hudson et al. 1997, Manning 2004.)

Taulukko 4. Kivituhkan määrä Lemminkäinen Infra Oy:ssä (Onnela 2018).

	2016 [t]	2017 [t]	Kertymä / Vuosi [t]	Kertymän osuus vuodesta 2017 [%]
0/3	824 300	875 800	51 500	5,9
0/6	118 000	127 300	9 300	7,3
Yhteensä	942 300	1 003 100	60 800	6,1

Maksimiraekooltaan pienimmät kivituhkalajikkeet, kuten KaM 0/2 ja KaM 0/3, ovat erityisen vaikeita hyötykäyttää. Esimerkiksi 0/3 kivituhkassa on suhteessa enemmän hienoainesta kuin 0/6 kivituhkassa. Hieno kiviaines pölyää kuivana, mutta toisaalta se vettyy helposti, jos sitä kastelee. 0/6 kivituhkalle onkin helpompi löytää käyttökohteita, sillä karkeampi kiviaines sitoo hienointa ainesta, jolloin pölyämis- ja vettymisriski pienenee. Tässä tutkimuksessa käytettiin 0/3 kivituhkaa YIT Infra Oy:n Malmgårdin murskaamolta. Kivituhkan ominaisuuksia on esitetty taulukossa 5 ja ulkonäkö kuvassa 11.

Taulukko 5. Kivituhka 0/3, Malmgård (Lemminkäinen Infra Oy 2017).

Ominaisuus	Suoritustaso (SFS-EN 13242 + A1)
Raekoko	0/3
Rakeisuus	G_{A85}
Raemuoto	FI_{NR}
Kiintotiheys	2,63 Mg/m ³
Vedenimeytyminen	0,30 %
Murtopintaisten rakeiden osuus	NPD
Nastarengaskulutuskestävyys	A_N7
Koostumus	Granodioriitti
Jäädytys-sulatuskestävyys	Hyväksytty $WA_{24}1$
Hienoainespitoisuus	f_7



Kuva 11. Kivituhka 0/3 Malmgård (Melander 2018).

4.3 Sementti

Sementti on hydraulinen sideaine, ja sitä käytetään erityisesti betonin valmistuksessa. Sementti valmistetaan kalsiumista, piistä, alumiinista, raudasta ja sulfaatista. Sementti valmistetaan murskaamalla ja sekoittamalla raaka-aineet, minkä jälkeen niitä poltetaan uunissa, jossa ne muodostavat klinkkeriä. Lopuksi klinkkeri jauhetaan ja sen sekaan sekoitetaan kipsiä, jolloin saadaan sementtiä. Sementin valmistuksessa voidaan myös käyttää seosaineita, jotka korvaavat klinkkeriä. Seosaineina voidaan käyttää teollisuuden sivutuotteita, kuten lentotuhkaa ja masuunikuonaa. Lisäksi voidaan käyttää esimerkiksi kalkkikiveä. Kemiallisen koostumuksen lisäksi sementin tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa hienous, lujuus, hydratoitumislämpö, tilavuuden pysyvyys ja notkeus. Hienous vaikuttaa hydraation nopeuteen ja sitä kautta lujuuden kehitykseen. Hienolla sementillä on suuri pinta-ala, jolloin hydraatio ja lujuuden kehitys on nopeampaa. Hydratoitumislämpö on tärkeää erityisesti suurien rakenteita valmistettaessa, sillä liian suuri hydratoitumislämpö voi aiheuttaa jännityksiä ja halkeamia. (Aalto-yliopisto 2018.)

Seosaineiden käyttö sementissä vähentää sementin tuotannon aiheuttamaa ympäristökuormaa. Seosaineilla on kuitenkin myös positiivisia vaikutuksia sementin ominaisuuksiin. Esimerkiksi masuunikuonalla voidaan saavuttaa yhtä luja rakenne kuin sementillä, mutta masuunikuonan lujittumisreaktio tuottaa vähemmän lämpöä. Kalkkikivi taas toimii sementissä fillerinä ja parantaa massan työstettävyyttä. Lisäksi useat seosaineet tiivistävät betonin huokosrakennetta ja hidastavat siten haitallisten aineiden tunkeutumista betoniin. Sementit on jaettu luokkiin CEM I, CEM II, CEM III sallittujen seosaineiden ja seosainemäärien mukaan. Esimerkiksi CEM I sementissä ei saa käyttää seosaineita, kun taas CEM II sementissä voidaan käyttää jopa 35 % seosaineita. (Aalto-yliopisto 2018.) Tässä tutkimuksessa käytettiin Finnsementti Oy:n Plussementtiä CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N, jonka ominaisuuksia on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Plussementti (Finnsementti Oy 2018).

Klinkkerin kemiallinen koostumus [%]		Tekniset tiedot	
CaO	63,0 - 65,0	Lujuus 28d	46 - 52 MPa
SiO ₂	20,0 - 22,0	Tilavuuden pysyvyys	0 - 1,5 mm
Al ₂ O ₃	4,0 - 5,4	Hienous	400 - 480 m ² /kg
Fe ₂ O ₃	2,8 - 3,3		
MgO	2,5 - 3,2		

Sementin seosaineet [%]	
Kalkkikivi	6 - 15
Masuunikuona	10 - 25

4.4 Lentotuhka

Lentotuhkaa muodostuu energiantuotannon sivutuotteena. Lentotuhka erotetaan poltossa syntyvistä savukaasuista suodattimien avulla ennen savukaasujen poistumista voimalaitoksesta. Tuhka kerätään suodattimista siiloihin tai kasoille varastoitavaksi. Varastointitapa voi kuitenkin aiheuttaa laatuvaihtelua, ja esimerkiksi ulkovarastointi huonontaa lentotuhkan sitoutumiskykyä sekä lisää vettymis- ja liettymisriskiä. (Rudus Oy 2008.) Lentotuhka on hienorakeista sekä kevyttä, ja sillä on hyvä lämmöneristyskyky. Lisäksi lentotuhkalla on sekä hydraulisia, että pozzolaanisia lujittumisominaisuuksia. Lentotuhkan ominaisuudet ovat kuitenkin riippuvaisia poltettavasta raaka-aineesta sekä sen laadusta. Myös itse polttoprosessi vaikuttaa tuhkan ominaisuuksiin. (Tiehallinto 2007 c.) Tuhkalaadut jaotellaan poltettavan raaka-aineen perusteella kivihiilen-, seos- ja rinnakkaispolton tuhkiin. Seospoltolla tarkoitetaan tavanomaisten polttoaineiden, kuten esimerkiksi turpeen ja puuperäisen aineksen, polttoa, kun taas rinnakkaispoltoilla tarkoitetaan jätteiden ja tavanomaisten polttoaineiden rinnakkaispoltoa. Kivihiilen polton tuhkat ovat usein tasalaatuisempia kuin seos- tai rinnakkaispolton tuhkat. (Ramboll Finland Oy 2012.) Kivihiilen ja turpeen poltossa syntyvä lentotuhka koostuu pääosin piin, alumiinin ja raudan oksideista, kun taas puun polton tuhka sisältää suurimmaksi osaksi kalsiumoksidia (Korpijärvi et al. 2009).

Lentotuhka on hienorakeista ja se koostuu pallomaisista sekä neulasmaisista rakeista. Sen rakeisuus vastaa siltin rakeisuutta. (Mäkelä & Höynälä 2000.) Lentotuhkaa voidaan käyttää muun muassa asfaltin täyteaineena, jolloin se korvaa maaperästä louhittavan kalkkifillerin. Lentotuhka parantaa asfaltin tiivistettävyyttä, vedenkestävyyttä sekä bitumin ja kiviaineksen tartuntaa. Lisäksi lentotuhkaa käytetään betonin tuotannossa korvaamaan sementtiä seosaineena. (Finn Ash-Power Oy 2018.) Lentotuhka parantaa tuoreen betonin työstettävyyttä ja pienentää betonin vesi/sideaine suhdetta. Lisäksi lentotuhka laskee hydraation lämmönkehitystä ja parantaa kovettuneen betonin puristuslujuutta. (Aalto-yliopisto 2018.) Maanrakennuksessa lentotuhkaa voidaan käyttää muun muassa pengertäytöissä, putkikaivantojen ari-noissa ja täytöissä sekä jakavissa kerroksissa. Lisäksi lentotuhkaa käytetään pihojen ja kenttien alusrakenteissa. (Rudus Oy 2008.) Lentotuhkaa, jolla on hyvät lujittumisominaisuudet, voidaan käyttää sideaineena stabiloinnissa korvaamaan sementtiä (Ramboll Finland Oy 2012). Lentotuhkan lujittumista voidaan parantaa aktivaattorin, esimerkiksi sementin, avulla (Mäkelä & Höynälä 2000). Lisäksi sitä voidaan käyttää metsäteollisuuden kuitulietteiden kanssa kaatopaikkojen tiiviissä eristekerroksissa (Tiehallinto 2007 c). Hienorakeisena materiaalina lentotuhka liettyy helposti, joten työt on toteutettava niin, että tuhkan levitys ja tiivistys voidaan tarvittaessa keskeyttää ja rakenne suojata (Mäkelä & Höynälä 2000).

Lentotuhka luokitellaan jätteeksi, ja sen käyttämiseen tarvitaan useimmiten ympäristölupa. Valtioneuvoston eräiden jätteiden maarakennuskäyttöä koskeva asetus (843/2017), MARA-asetus, kuitenkin mahdollistaa lentotuhkan käytön joissain tapauksessa ilman ympäristölupaa. MARA-asetuksessa on määritetty lentotuhkalle haitta-ainespitoisuuden ja -liukoisuuden raja-arvot, joiden alittuessa lentotuhkaa voidaan käyttää maanrakennuksessa ilmoitusmenettelyllä. (VNa 843/2017.) Rajoitukset lentotuhkan käytölle aiheutuvat erityisesti tuhkien sisältämien raskasmetallien takia (Mäkelä & Höynälä 2000).

Suomessa muodostuu vuosittain noin 1,5 miljoonaa tonnia tuhkia (Ramboll Finland Oy 2012). Vuosittain syntyvistä tuhista noin puolet saadaan hyödynnettyä, ja puolet sijoitetaan kaatopaikoille. Tuhkien käytön yleistymistä maarakentamisessa hidastavat käyttöön liitty-

vien hallinnollisten menettelyiden lisäksi varastointi- ja kuljetusongelmat. Suurin osa tuhista syntyy talvella, kun taas maarakentaminen tapahtuu usein kesäkaudella. Lisäksi voimalaitokset eivät yleensä sijaitse käyttökohteiden, eli useimmiten asutuksen, lähellä. Myös epävarmuus materiaalin teknisistä ominaisuuksista ja soveltuvuudesta estää tuhkien käytön yleistymistä. (Korpijärvi et al. 2009.)

Tässä tutkimuksessa käytettiin Elenia Oy:n Hämeenlinnan voimalaitoksen lentouhkaa, joka on nähtävissä kuvassa 12. Voimalaitoksessa poltetaan biopolttoaineita, jotka ovat pääosin puuhaketta ja osittain turvetta. Tuhka täyttää MARA-asetuksen asettamat vaatimukset teiden ja väylien osalta. Lisäksi tuhka täyttää asetuksen vaatimukset päällystettyjen kenttien osalta.



Kuva 12. Lentotuhka, Elenia Oy Hämeenlinna (Melander 2018).

4.5 Masuunikuona

Masuunikuona on rauta- ja terästeollisuuden sivutuote. Sitä muodostuu malmin sivukivistä sekä kalkkikivistä, ja se erottuu raakaraudan pinnalle masuunissa. (Eerola 2001.) Sula kuona jäähdytetään vedellä tai ilmassa, jolloin se jähmettyy rakeiseksi materiaaliksi. Kovettunutta kuonaa voidaan murskata tai jauhaa halutun raekoon saavuttamiseksi. Masuunikuonan jäähdyttämistä vedellä kutsutaan granuloinniksi. Granuloinnissa kuona jäähdytetään niin nopeasti, että se ei ehdi kiteytyä vaan jää lasimaiseen tilaan. Granuloitua masuunikuonaa kutsutaan masuunihiekaksi, kun taas ilmassa jäähdytettyä, murskattua masuunikuonaa kutsutaan masuunikuonamurskeeksi. (Mäkelä & Höynälä 2000.)

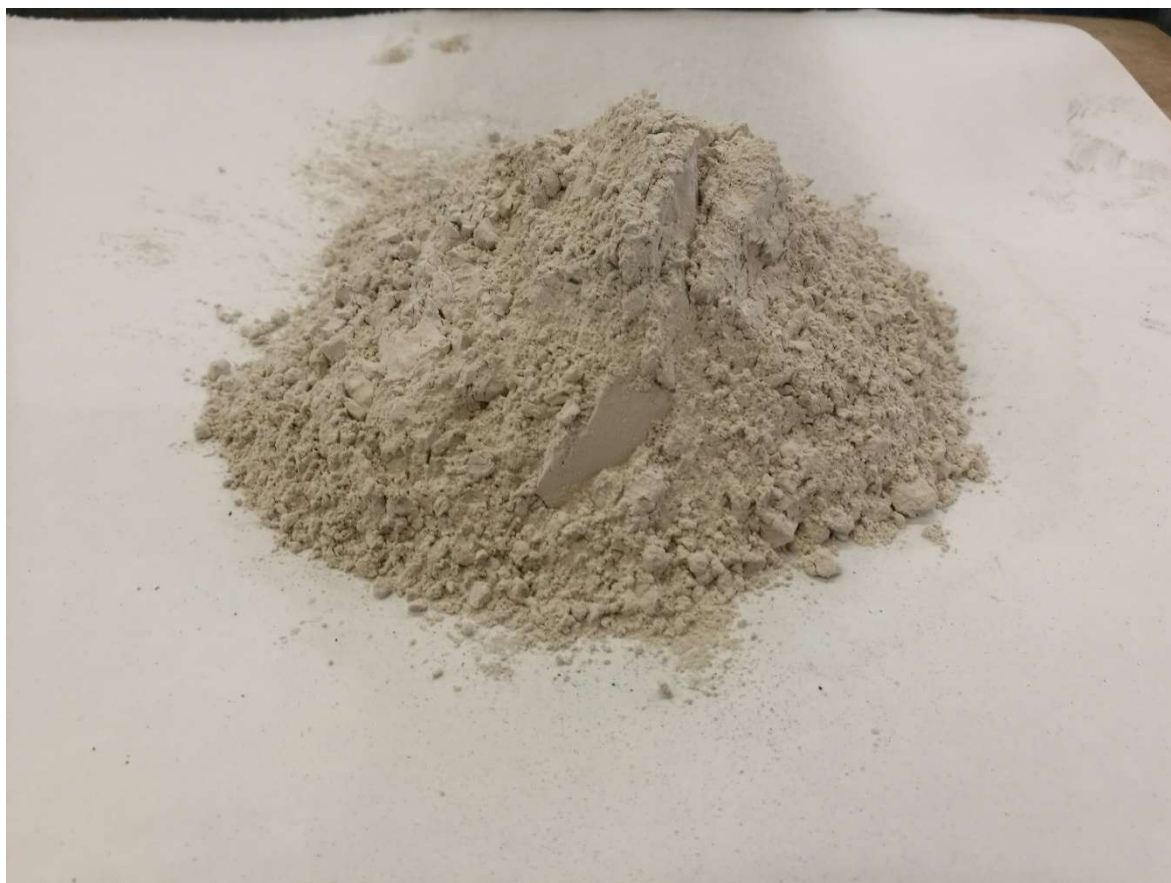
Masuunihiekan kemiallinen koostumus riippuu raudan valmistusprosessista, mutta se koostuu pääasiassa piin, kalsiumin, alumiinin ja magnesiumin oksideista. Rakeisuudeltaan se vastaa luonnonhiekan rakeisuutta, mutta sen rakeet ovat teräväsärmäisempiä kuin luonnonmateriaalien. (Mäkelä & Höynälä 2000.) Masuunihiekalla on koostumuksensa ja rakenteensa ansiosta hydraulisia lujittumisominaisuuksia, ja sitä käytetään betonin valmistuksessa sekä maaperän stabiloinnissa korvaamaan sementtiä sideaineena. Masuunihiekan lujittumiseen vaikuttavat materiaalin hienous sekä kuonan emäksisyys ja lasimaisuusaste. (Finnsementti Oy 2015, Tiehallinto 2007 c.) Masuunikuonan sitoutumisreaktio on hitaampi kuin sementin, ja se saavuttaa lopullisen lujuutensa vasta kolmen kuukauden ikäisenä. Masuunikuonan hidas sitoutuminen vähentää kutistumahalkeamia alhaisemman hydraation lämmönkehityksen ansiosta. Lisäksi se pienentää betonin aikaista puristuslujuutta, mutta kasvattaa lopullista puristuslujuutta. Masuunikuonan hydraatiota voidaan kuitenkin nopeuttaa aktivaattorin, kuten esimerkiksi sementin, avulla. (Tielaitos 2000.) Masuunihiekan sitoutuminen tapahtuu rakeiden pinnoilla, ja pinnan rikkoutuessa reaktio käynnistyy uudella pinnalla. Tämän ansiosta masuunihiekkarakenne korjautuu halkeamakohdista, ja esimerkiksi epätasaisen routanousun aiheuttama vaurio ei aiheuta rakenteelle pysyvää vauriota. Tämä mahdollistaa rakenteen pidemmän käyttöiän. (Mäkelä & Höynälä 2000, Tielaitos 2000.)

Masuunikuonamurske on huokoisempaa kuin luonnonkiviaines, minkä lisäksi sen rakeet ovat karkeampia ja särmikkäämpiä. Huokoinen rakenne antaa masuunikuonamurskeelle hyvän lämmöneristykyvyn, kun taas karkea rakenne kasvattaa materiaalin kantavuusarvoa. Masuunikuonamursketta voidaan käyttää tie- ja katurakenteissa kantavassa ja jakavassa kerroksessa. (Mäkelä & Höynälä 2000.) Masuunikuonamurskeen avulla voidaan vähentää rakenteen kokonaispainoa tai pienentää routamitoituksessa vaadittua rakennepaksuutta (Eerola 2001). Myös masuunihiekkaa voidaan käyttää lämmöneristeenä tai pihojen täyttömateriaalina (Mäkelä & Höynälä 2000).

Suomessa muodostuu vuosittain noin 550 000 tonnia masuunihiekkaa ja 100 000 tonnia masuunikuonamursketta (Lahtinen et al. 2005). Osa masuunikuonista kuuluu jätelainsäädännön piiriin, mutta osa on luokiteltu tavanomaiseksi kauppatavaraksi (Tiehallinto 2007 c). Tässä tutkimuksessa käytettiin Finnsementti Oy:n masuunikuonajauhetta KJ400, joka on jauhattua granuloitua masuunikuonaa. Masuunikuonajauheen ominaisuuksia on esitetty taulukossa 7 ja ulkonäkö kuvassa 13.

Taulukko 7. Masuunikuonajauhe KJ400 (Finnsementti Oy 2015).

Kemiallinen koostumus [%]		Tekniset tiedot	
CaO	36,0 - 42,0	Väri	52 - 56 % (ISO4270)
SiO ₂	36,0 - 40,0	Olomuoto	Jauhe
Al ₂ O ₃	8,0 - 10,0	Kiintotiheys	2900 kg/m ³
MgO	10,0 - 12,0	Irtotiheys	1200 kg/m ³
S	1,5 - 2,0	Hienous	400 m ² /kg
Ti	0,9 - 1,3		
K ₂ O	0,5 - 1,0		
Na ₂ O	0,5 - 1,0		



Kuva 13. Masuunikuonajauhe, Finnsementti Oy KJ400 (Melander 2018).

4.6 Ecolan Oy:n uusiosideaine

Tutkimuksessa käytettiin sideaineena myös Ecolan Oy:n valmistamaa uusiosideainetta. Sideaine on kehitteillä oleva tuote, ja tässä tutkimuksessa käytetty sideaine toimitettiin tutkimusta varten 9.3.2018. Sideaine on tuhkan ja sementin seos, jossa on 80 % lentotuhkaa ja 20 % sementtiä. Lentotuhka on jauhattua kivihiilenpolton tuhkaa, ja sementti on CEM 1 42,5 N sementtiä. (Hintikka 2018.)

5 Laboratoriotutkimukset

5.1 Runkoaineiden ominaisuudet

Tutkimuksessa käytettyjen runkoaineiden, 0/32 kalliomurskeen ja 0/3 kivituhkan, ominaisuuksia tutkittiin laboratoriokokeiden sekä valmistajan ilmoittamien tietojen avulla. Laboratoriossa määritettiin runkoaineiden kosteus, rakeisuus ja optimivesipitoisuus. Ennen kokeiden aloittamista runkoaineet homogenisoitiin mahdollisimman luotettavien koetuloksien ja tasalaatuisten koekappaleiden saavuttamiseksi. Murske homogenisoitiin jakajan, ja kivituhka tasosekoittimen avulla. Runkoaineiden kosteus määritettiin standardin SFS-EN 1097-5 mukaisesti. Rakeisuus määritettiin pesuseulontamenetelmällä standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti, ja pesuseulontalaitteisto on esitetty kuvassa 14. Runkoaineiden optimivesipitoisuus määritettiin ICT-kiertotiivistimellä, joka on nähtävissä kuvassa 15.



Kuva 14. Seulontalaitteisto (Melander 2018).



Kuva 15. ICT-kiertotiivistin (Melander 2018).

5.2 Koekappaleiden valmistus ja säilytys

Tutkimuksessa tehtiin kahdeksan erilaista massaa, joiden runkoaineena on kivituhka. Sideaineina käytettiin sementtiä, lentotuhkaa, masuunikuonaa sekä Ecolan Oy:n sideainetta. Referenssimateriaaliksi tehtiin koekappaleet murskeen ja sementin seoksesta. Referenssimateriaalin avulla pyrittiin saamaan kivituhkan massoille perinteistä stabilointia vastaava vertailukohde.

Stabilointimassojen suhteituksessa hyödynnettiin Tiehallinnon julkaisua Päälysrakenteen stabilointi (2007 b). Julkaisun mukaan sementtipitoisuuden tulee olla 2,5-5 % stabilointimassan kuivapainosta. Tutkimuksessa päätettiin käyttää sementille sideainepitoisuuksia 4 % ja 6 %, joista toinen on ohjealueella ja toinen hieman ohjealueen yläpuolella. Masuunikuonaa taas tulee ohjeen mukaan olla 4-10 %, kun aktivaattoria käytetään 0,5-1,5 %, tai 5-15 % ilman aktivaattoria. Tutkimuksessa päätettiin käyttää aktivaattoria, ja masuunikuonan määriksi valittiin 8 % ja 12 %. Myös masuunikuonan osalta toinen sideainepitoisuus on siis ohjealueella, ja toinen hieman sen yläpuolella. Aktivaattorina käytettiin sementtiä. Tutkimuksessa päätettiin käyttää ohjearvoja suurempia sideainepitoisuuksia, koska kivituhka on rakeisuudeltaan paljon hienompaa kuin kiviaines, jolle ohje on tarkoitettu. Masuunikuonan osalta on kuitenkin huomioitava, että Tiehallinnon julkaisun Päälysrakenteen stabilointi (2007 b) mukaiset sideainepitoisuudet on määritetty masuunihiekkaa sisältävälle stabilointimassalle, kun taas tässä tutkimuksessa käytettiin jauhattua masuunihiekkaa. Lentotuhkapiitoisuuden valinnassa hyödynnettiin Lemminkäinen Infra Oy:n vuonna 2013 tekemästä tut-

kimuksesta saatuja tuloksia sekä kokemuksia, ja lentotuhkaa päätettiin käyttää 50 % stabilointimassan kuivapainosta. Myös lentotuhkan kanssa käytettiin aktivaattoria, joka oli sementtiä. Ecolan Oy:n sideaineelle sopiva pitoisuus päätettiin valmistajan kanssa, ja sideainepitoisuuksiksi valittiin 4 % ja 6 %. Tutkimuksessa käytetyt sideainepitoisuudet on esitetty taulukossa 8.

Koekappaleet tehtiin ICT-kiertotiivistimen avulla 96 % tiiveyteen. 96 % tiiveys valittiin Tiehallinnon julkaisun Päälysrakenteen stabilointi (2007 b) mukaisesti, jotta koekappaleiden tiivistys vastaisi mahdollisimman hyvin työmaaolosuhteissa saavutettavaa tiivistystasoa. 96 % tiiveys määritettiin maksimitiheydestä, johon ICT-kiertotiivistin tiivistä stabilointimassan 200 kierroksen aikana. Koekappaleiden koko valittiin runkoaineen maksimiraekoon mukaan. Massa, jonka runkoaineena oli murske, tehtiin halkaisijaltaan 150 mm muotteihin, kun taas kivituhkan massat tehtiin halkaisijaltaan 100 mm muotteihin. Koekappaleet tehtiin niin, että niiden halkaisija ja korkeus ovat yhtä suuret. Massat valmistettiin runkoaineen optimivesipitoisuuteen. Poikkeuksena tähän olivat kuitenkin lentotuhkalla stabiloidut massat, jotka tehtiin kivituhkan ja lentotuhkan seoksen arvioituun optimivesipitoisuuteen seoksen suuren sideainepitoisuuden takia. Jokaisesta massasta valmistettiin 12 koekappaletta kokeita varten, minkä lisäksi jokaisesta massasta valmistettiin 2-3 varakappaletta. Koekappaleet säilytettiin kosteasäilytyksessä ilman muotteja koestuspäivään asti. Koekappaleiden ylä- ja alapinnat tasoitettiin rikittämällä ennen puristuskokeiden aloittamista, jotta pintojen mahdolliset epätasaisuudet eivät vääristäisi tutkimustuloksia. Koekappaleiden säilytysolosuhteet on nähtävissä kuvassa 16, kun taas koekappaleiden rikitys on esitetty kuvassa 17.



Kuva 16. Koekappaleiden säilytys (Melander 2018).



Kuva 17. Koekappaleiden rikitys (Melander 2018).

Taulukko 8. Tutkimuksessa käytetyt stabilointimassat. Sideaine- ja aktivaattoripitoisuudet stabilointimassan kuivapainosta.

Tunniste	Runko- ja sideaine	Sideaine [%]	Aktivaattori [%]	Koekappale Ø [mm]
MS4,5	murske + sementti	4,5	-	150
KS4	kivituhka + sementti	4	-	100
KS6	kivituhka + sementti	6	-	100
KL50A1	kivituhka + lentotuhka	50	1	100
KL50A3	kivituhka + lentotuhka	50	3	100
KM8A1	kivituhka + masuunikuona	8	1	100
KM12A1	kivituhka + masuunikuona	12	1	100
KE4	kivituhka + Ecolan	4	-	100
KE6	kivituhka + Ecolan	6	-	100

Taulukko 9. Koematriisi.

Massa	Puristuslujuus 7d 3 koekappaletta / koe	Puristuslujuus 28d 3 koekappaletta / koe	Pakkasrapautumiskestävyys 2 x 3 koekappaletta / koe
MS4,5	x	x	x
KS4	x	x	x
KS6	x	x	
KL50A1	x	x	
KL50A3	x	x	x
KM8A1	x	x	
KM12A1	x	x	
KE4	x	x	
KE6	x	x	x

5.3 Puristuslujuus

Koekappaleiden lujuus mitattiin yksiaksiaalisen puristuskokeen avulla. Puristuskokeet tehtiin standardin SFS-EN 13286-41 mukaisesti, ja ne tehtiin kaikille massoille. Koekappaleiden puristuslujuudet mitattiin 7 ja 28 päivän ikäisenä. Tavoitearvoina käytettiin Tiehallinnon ohjeen Päälysrakenteen stabilointi (2007 b) mukaisia vaatimuksia, jotka on esitetty taulukossa 10. Jokaisesta massasta koestettiin kolme koekappaletta, joiden lujuuksien keskiarvoa verrattiin tavoitearvoihin.

Taulukko 10. Puristuslujuuden tavoitearvot (Tiehallinto 2007 b).

	Puristuslujuus 7d [MPa]	Puristuslujuus 28d [MPa]
Sementtistabilointi	3 - 8	5 - 13
Masuunihiekkastabilointi	-	1 - 2

Puristuskokeessa koekappale asetetaan puristuslaitteeseen, joka ilmoittaa suurimman laitteen käyttämän puristusvoiman ennen koekappaleen murtumista. Voiman ja koekappaleen puristuspinna-alan avulla voidaan laskea kappaleen lujuus kaavalla 4.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

jossa

σ = puristusjännitys MPa

F = puristusvoima (N)

A = koekappaleen poikkipinta – ala (mm²)

Puristuskokeissa käytettiin kahta eri puristuslaitetta, jotka ovat nähtävissä kuvassa 18. Lloydin puristuslaitteen kalibroitu kuormitusalue on 0-50 kN, joten sillä koestettiin lujuudeltaan alhaisemmat koekappaleet. Seidnerin puristuslaitteella koestettiin koekappaleet, jotka eivät murtuneet 50 kN voimasta, ja sen kalibroitu kuormitusalue on välillä 50-500 kN. Molempien laitteiden standardin SFS-EN ISO 7500-1 mukainen tarkkuusluokka on 1.



Kuva 18. Puristuslaitteet. Seidner vasemmalla, Lloyd oikealla. (Melander 2018.)

5.4 Pakkasrapautumiskestävyys

Stabilointimassojen pakkasrapautumiskestävyys määritettiin jäädytys-sulatuskokeen avulla. Jäädytys-sulatuskokeet tehtiin teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 mukaisesti. Koekappaleita ei kuitenkaan säilytetty niiden muoteissa, vaan ne säilytettiin standardista poiketen ilman muotteja. Kokeessa käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 19.

Teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 mukaisessa jäädytys-sulatuskokeessa käytetään kahta kolmen koekappaleen sarjaa, joista toisen sarjan koekappaleet altistetaan kymmenelle

jäädytys-sulatussyklille. Jokainen sykli kestää 24 tuntia, eli koekappaleet ovat jäädytys-sulatuskaapissa kymmenen päivää. Jäädytys-sulatussykliä jälkeen molempien sarjojen koekappaleille tehdään yksiaksiaalinen puristuskoe, ja pakasrapautumiskestävyys saadaan vertaamalla jäädytys-sulatuskaapissa olleiden koekappaleiden (SET A) puristuslujuuksien keskiarvoa vertailusarjan (SET B) puristuslujuuksien keskiarvoon kaavan 5 mukaisesti.

$$R = \frac{R_A}{R_B} \cdot 100\% \quad (5)$$

jossa

R = pakasrapautumiskestävyys (%)

R_A = jäädytys – sulatussykleille altistettujen koekappaleiden (SET A)

yksiaksiaalisen puristuslujuuden keskiarvo (MPa)

R_B = vertailusarjan koekappaleiden (SET B) yksiaksiaalisen puristus – lujuuden keskiarvo (MPa)

Jäädytys-sulatuskokeet tehtiin referenssimateriaalille, eli massalle MS4,5, sekä kolmelle puristuslujuuden (7d) ja hinnan perusteella parhaalle kivituhkan massalle. Kivituhkan massoista jäädytys-sulatuskokeeseen valittiin sementtistabiloitu massa KS4, lentotuhkalla stabiloitu massa KL50A3 sekä Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6. Jäädytys-sulatuskaappeja oli tutkimuksen aikana käytössä kaksi, ja koekappaleet jaettiin kaappeihin niin, että yhdessä kaapissa olivat massan MS4,5 koekappaleet ja toisessa kaapissa massat KS4, KL50A3 ja KE6. Jäädytys-sulatussyklit aloitettiin koekappaleiden ollessa mahdollisimman lähellä 28 päivän ikää. Massan MS4,5 koekappaleiden jäädytys-sulatussyklit aloitettiin 28 päivän ikäisenä, kun taas toisen kaapin syklit aloitettiin niin, että massan KS4 valmistuksesta oli 30 päivää, massan KL50A3 valmistuksesta 29 päivää ja massan KE6 valmistuksesta 25 päivää. Tavoitearvoina käytettiin Tiehallinnon julkaisun Päälyysrakenteen stabilointi (2007 b) mukaisia vaatimuksia, jotka on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Pakasrapautumiskestävyyden tavoitearvot (Tiehallinto 2007 b).

	Pakasrapautumiskestävyys [%]
Sementtistabilointi	≥ 67
Masuunihiekkastabilointi	≥ 40

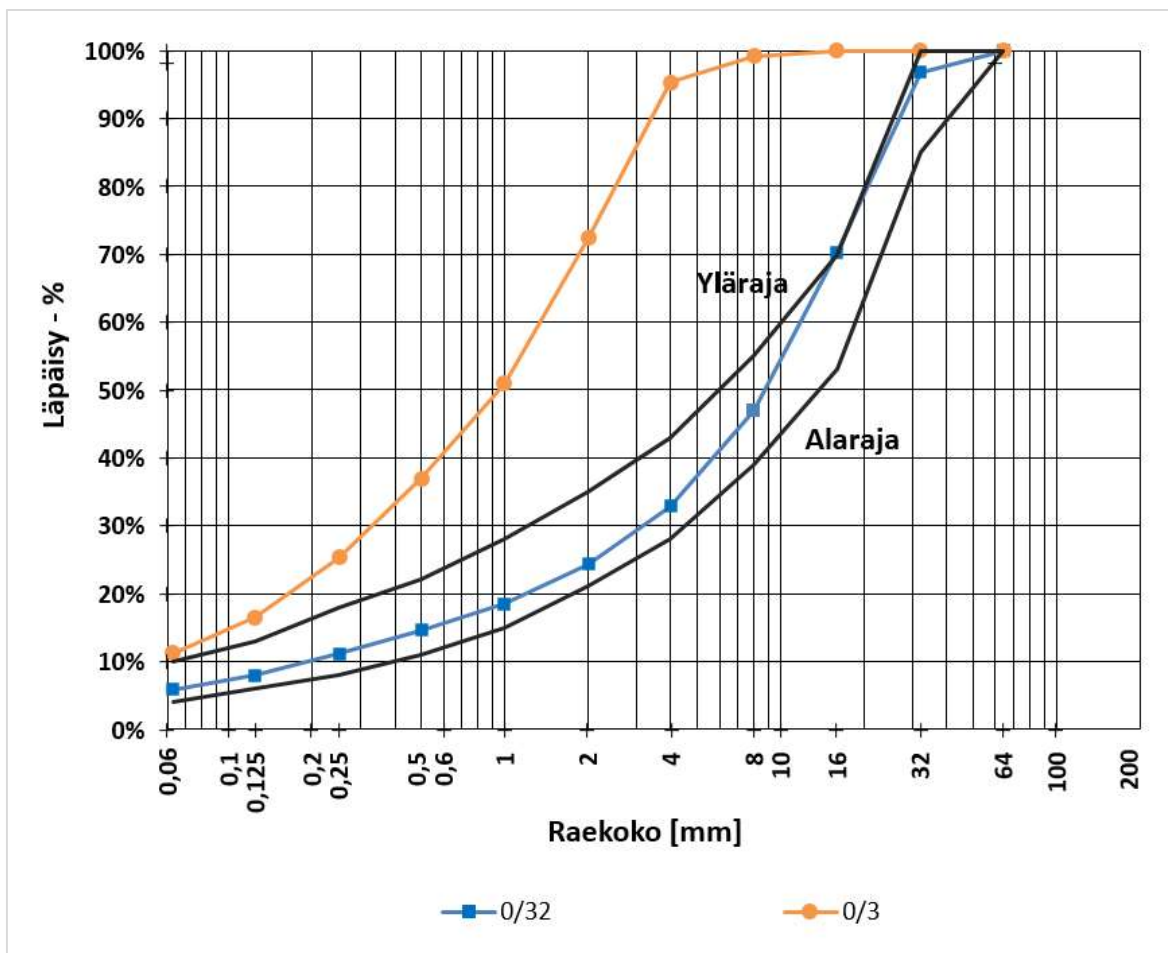


Kuva 19. Jäädytys-sulatuskaappi (Melander 2018).

6 Tutkimustulokset

6.1 Runkoaineiden ominaisuudet

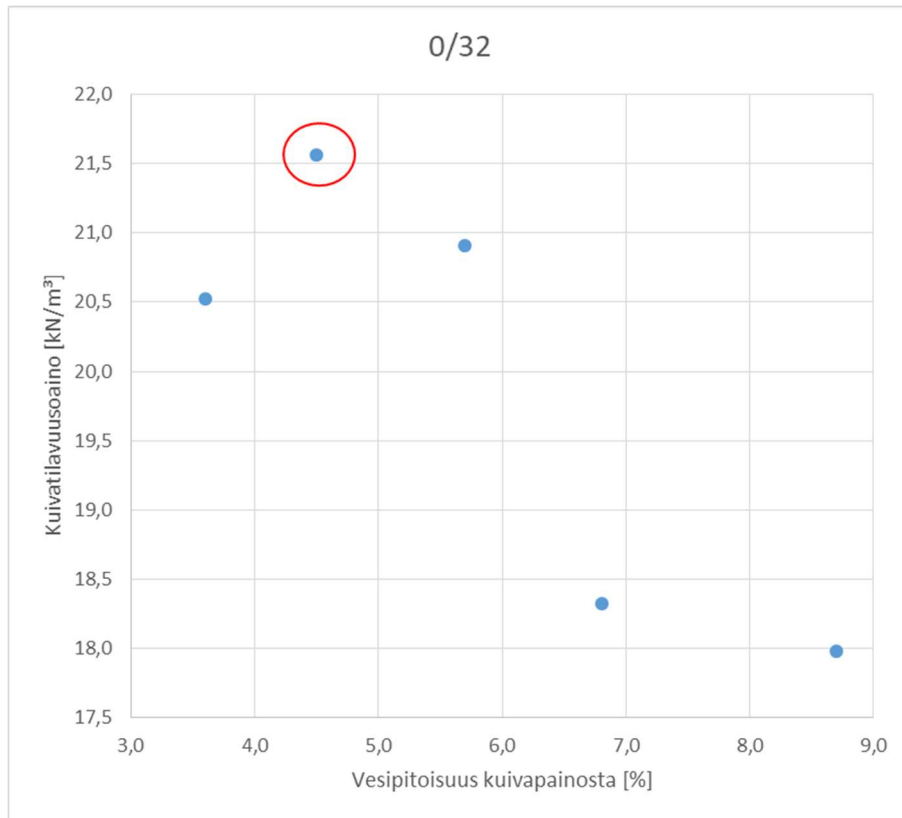
Runkoaineiden rakeisuuden määrittämiseksi varmistettiin, että referenssimateriaalina käytetyn stabilointimassan MS4,5 runkoaine KaM 0/32 oli Tiehallinnon Päälysrakenteen stabilointiohjeen (2007 b) vaatimusten mukainen. Muissa stabilointimassoissa käytetty kivituhka 0/3 ei ollut ohjeen vaatimusten mukainen. Rakeisuuden määrittämisen tulokset on esitetty kuvassa 20.



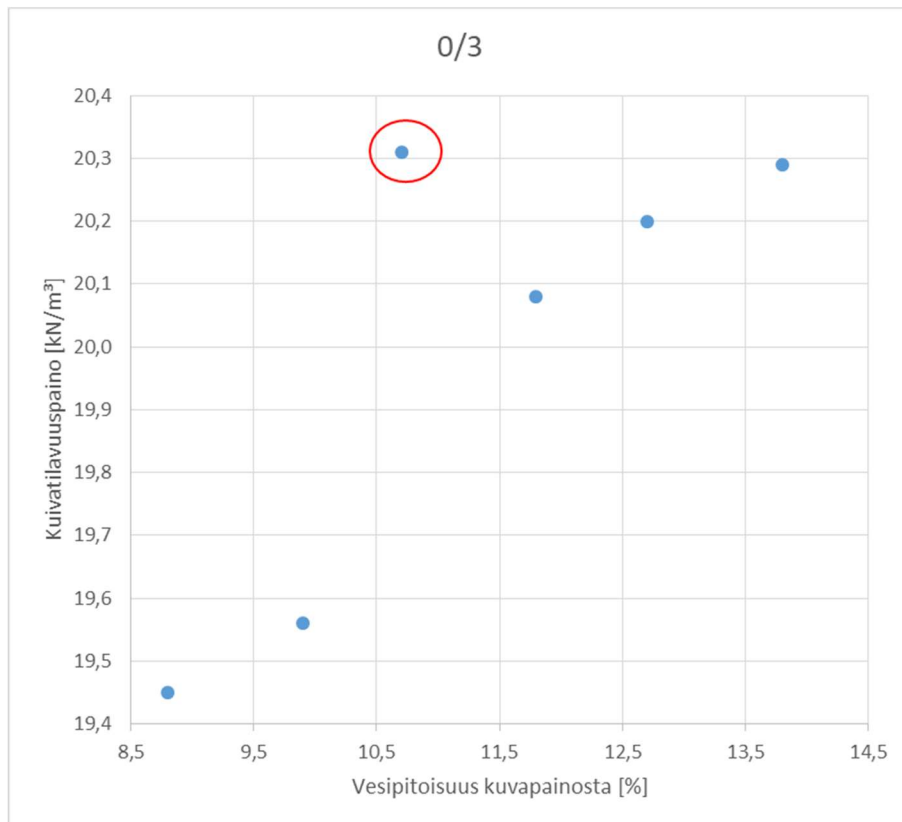
Kuva 20. Runkoaineiden rakeisuuskäyrät sekä KaM 0/32 rakeisuuden ylä- ja alaraja.

Runkoaineiden kosteudet ja optimivesipitoisuudet määritettiin stabilointimassojen valmistusta varten. Kirjallisuusselvityksen perusteella havaittiin, että lentotuhkan optimivesipitoisuus vaihtelee välillä 20 ... 50 % (Ramboll Finland Oy 2012, Rudus Oy 2008), kun taas Lemminkäinen Infra Oy:n vuonna 2013 tekemässä tutkimuksessa kivituhkan ja lentotuhkan seoksen optimivesipitoisuus oli 16 %. Näiden tietojen perusteella päätettiin valita lentotuhkaa sisältävien massojen tavoitekosteudeksi 15 %. Muiden massojen tavoitekosteutena käytettiin runkoaineiden optimivesipitoisuuksia, jotka on esitetty kuvissa 21 ja 22, sekä taulukossa 12. KaM 0/3 optimivesipitoisuuden määrittämisessä muodostettu kuvaaja ei ole tyypillisen optimivesipitoisuuden kuvaajan näköinen, sillä siinä ei ole yhtä selkeää huippua. Tämä johtuu siitä, että vesipitoisuuksien 12,7 % ja 13,8 % kohdalla

koekappaleesta pursui tiivistyksen aikana niin paljon vettä, että se vääristi optimivesipitoisuuden määrittelyn tuloksia.



Kuva 21. KaM 0/32 optimivesipitoisuuden määrittely.



Kuva 22. KaM 0/3 optimivesipitoisuuden määrittely.

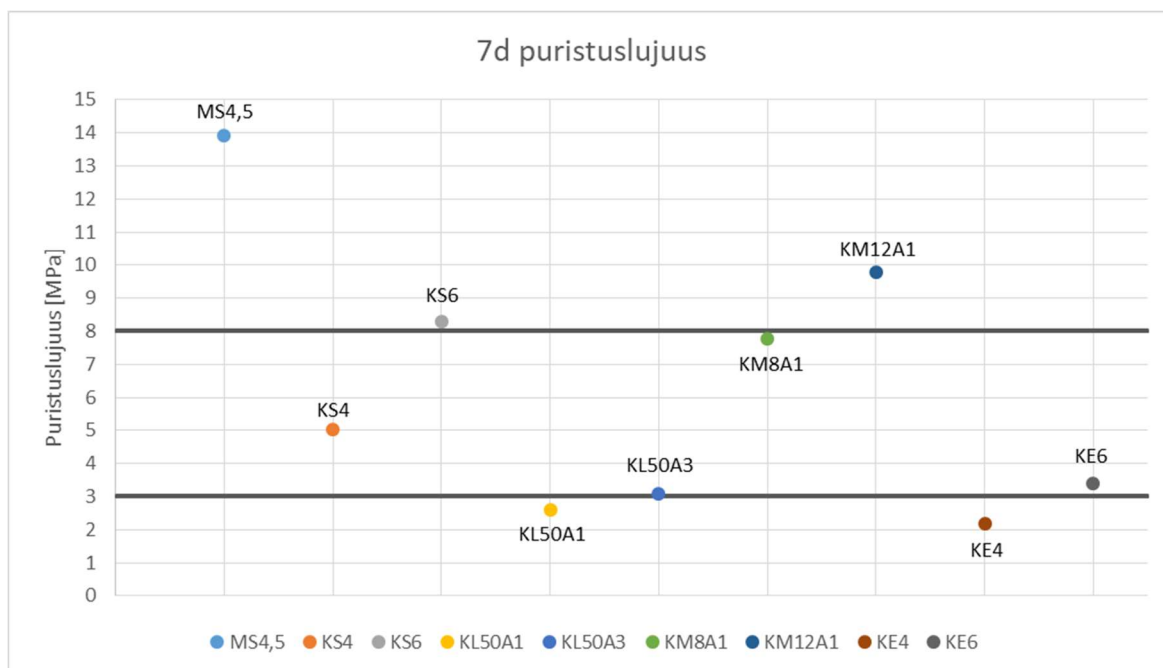
Taulukko 12. Runkoaineiden kosteudet ja optimivesipitoisuudet.

	Kosteus [%]	Optimivesipitoisuus [%]
KaM 0/32	3,0	4,5
KaM 0/3	5,7	10,7

6.2 Puristuslujuus

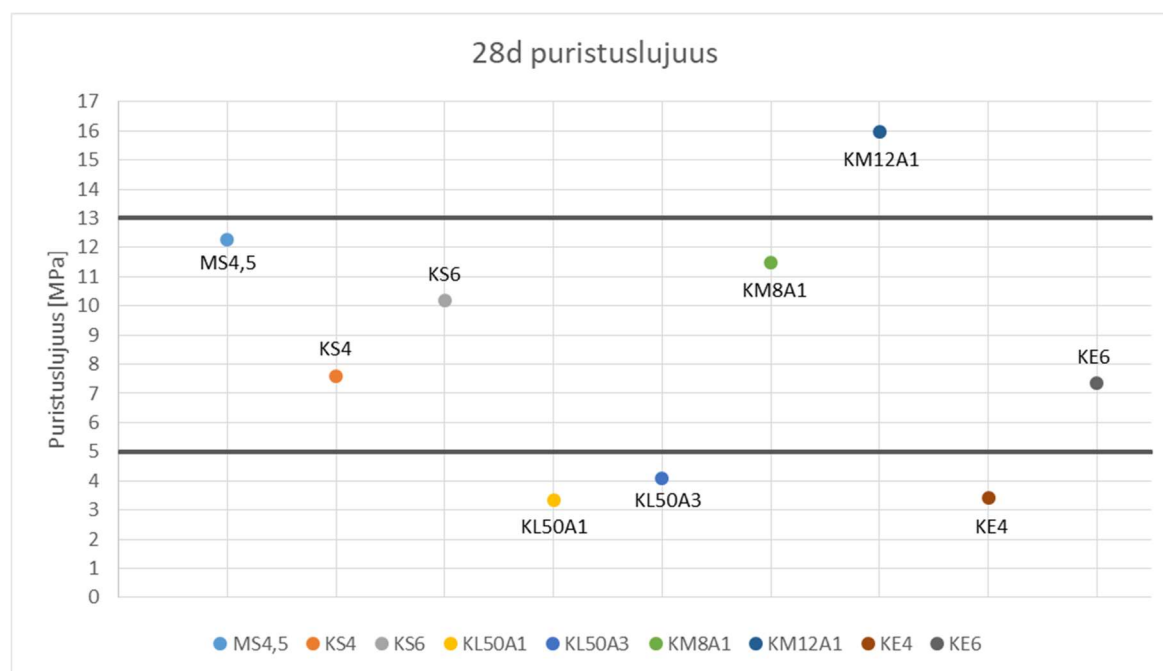
Stabilointimassojen lujuus mitattiin yksiaksiaalisen puristuskokeen avulla. Lujuuksia verrattiin Tiehallinnon Päällysrakenteen stabilointiohjeen (2007 b) sementtistabiloinnin vaatimukseen. Kaikkia stabilointimassoja päätettiin verrata sementtistabiloinnin vaatimukseen, sillä tutkimuksessa havaittiin, että vaikka massoissa KM8A1 ja KM12A1 käytettiin sideaineena masuunikuonaa, niiden lujuudet vastasivat paremmin sementtistabiloinnilla saavutettavia lujuuksia. Syynä tähän on luultavasti se, että Tiehallinnon ohjeen Päällysrakenteen stabilointi (2007 b) masuunikuonaa sisältävien stabilointimassojen tavoitearvot ovat määritetty masuunihiekalla stabiloidulle massalle, kun taas tässä tutkimuksessa käytettiin jauhettua masuunihiekkaa. Koska masuunikuona reagoi rakeiden pinnoilla ja jauhaminen kasvattaa materiaalin pinta-alaa, niin jauhetulla masuunihiekalla saavutetaan suurempia lujuuksia kuin tavallisella masuunihiekalla.

Kun kaikkia massoja verrattiin sementtistabiloinnin vaatimukseen, niin sementtistabiloidun massan KS4, lentotuhkalla stabiloidun massan KL50A3, masuunikuonalla stabiloidun massan KM8A1 sekä Ecolan Oy:n sideainetta sisältävän massan KE6 lujuudet olivat tavoitearvojen mukaisia 7d puristuslujuuden osalta. Muut massat, mukaan lukien referenssimateriaali massa MS4,5, eivät täyttäneet ohjeen vaatimuksia. Referenssimateriaalin MS4,5, sementtistabiloidun massan KS6 ja masuunikuonalla stabiloidun massan KM12A1 lujuudet olivat liian korkeita, kun taas lentotuhkalla stabiloidun KL50A1 ja Ecolan Oy:n sideaineella stabiloidun massan KE4 lujuudet olivat liian alhaisia. 7d puristuskokeen tulokset on esitetty kuvassa 23.



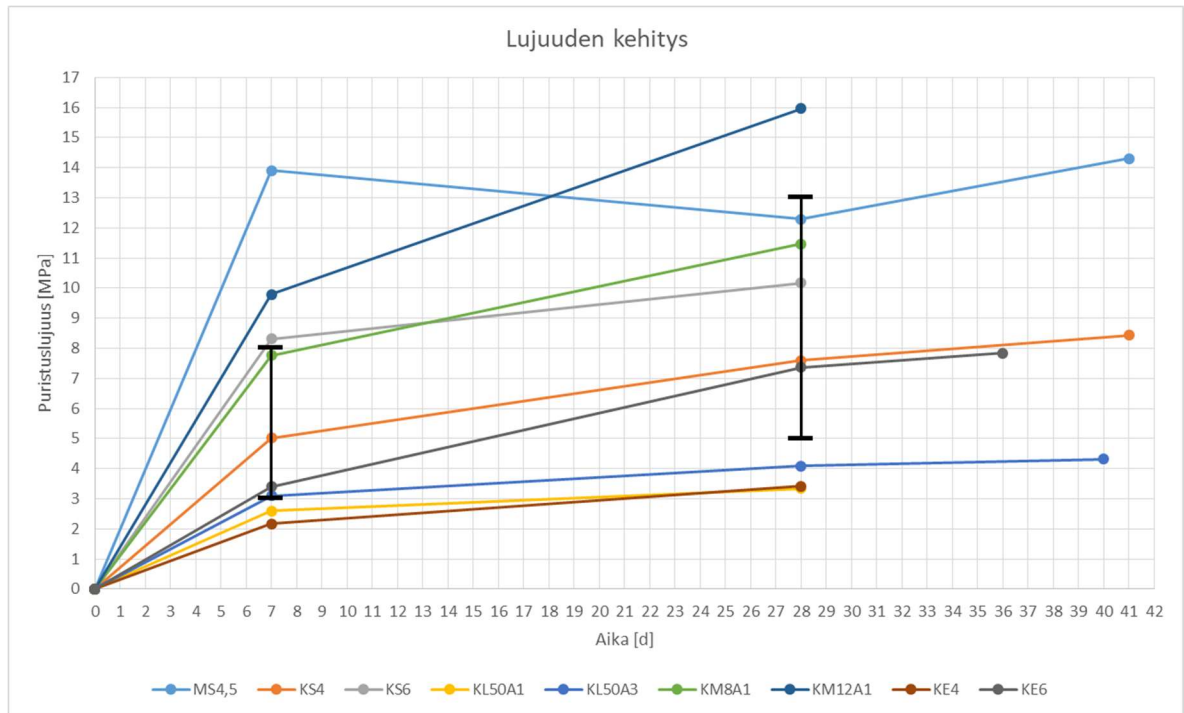
Kuva 23. 7d puristuslujuudet.

28d puristuslujuuden osalta referenssimateriaalin MS4,5, sementtistabiloitujen massojen KS4 ja KS6, masuunikuonalla stabiloidun massan KM8A1 sekä Ecolan Oy:n sideaineella stabiloidun massan KE6 lujuudet olivat tavoitearvojen mukaisia. Lentouhkaa sisältävien massojen KL50A1 ja KL50A3, sekä Ecolan Oy:n sideaineella stabiloidun massan KE4 lujuudet olivat liian alhaisia, kun taas masuunikuonalla stabiloidun massan KM12A1 lujuus oli liian korkea. 28d puristuskokeen tulokset on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. 28d puristuslujuudet.

Sementtistabiloitu massa KS4, masuunikuonaa sisältävä massa KM8A1 ja Ecolan Oy:n si-deaineella stabiloitu massa KE6 olivat ainoita, joiden puristuslujuudet olivat tavoitealueella sekä 7d että 28d puristuskokeen osalta. Kuvassa 25 ja taulukossa 13 on esitetty molempien puristuskokeiden tulokset, sekä jäädytys-sulatuskokeessa vertaussarjasta (SET B) mitatut lujuudet, mikäli kyseinen massa oli ollut jäädytys-sulatuskokeessa.

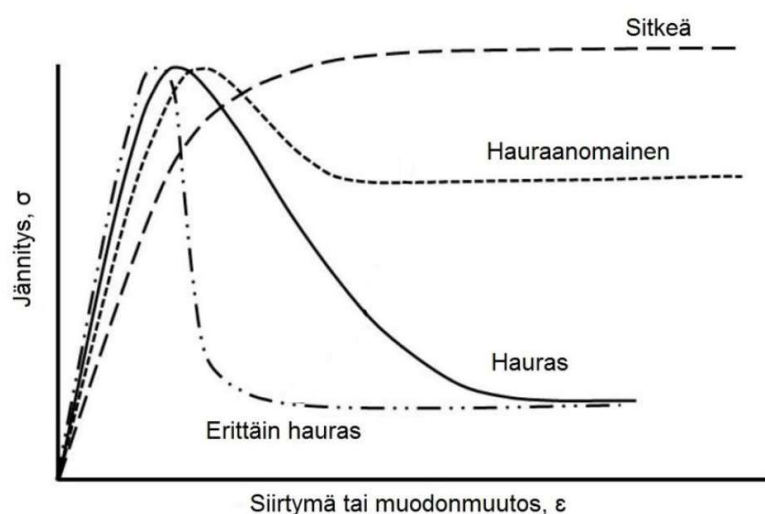


Kuva 25. Puristuslujuuden kehitys.

Taulukko 13. Puristuskokeiden tulokset.

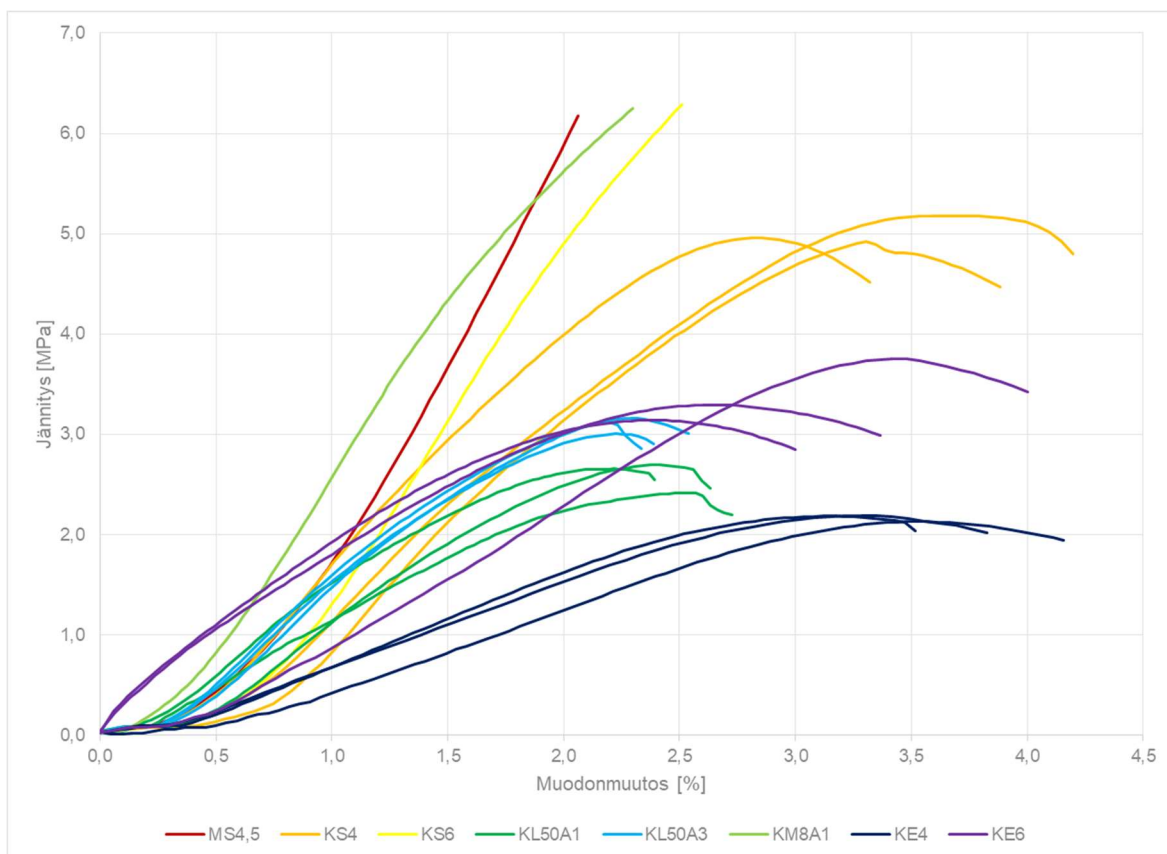
Massa	Puristuskokeet		Jäädytys-sulatuskoe	
	7d [MPa]	28d [MPa]	Ikä [d]	Lujuus [MPa]
Vaatus	3 - 8	5 - 13		
MS4,5	13,91	12,29	41	14,31
KS4	5,02	7,59	41	8,44
KS6	8,31	10,17		
KL50A1	2,59	3,34		
KL50A3	3,09	4,09	40	4,32
KM8A1	7,76	11,47		
KM12A1	9,79	15,96		
KE4	2,17	3,42		
KE6	3,40	7,36	36	7,84

Lloydin puristuslaitteella tehdyistä 7d puristuskokeista määritettiin myös koekappaleiden jännitys-muodonmuutoskuvaajat, jotka on esitetty kuvassa 27. Seidnerin puristuslaitteella koestetuista koekappaleista ei voitu muodostaa jännitys-muodonmuutoskuvaajia, sillä puristuslaite ei tallenna kuvaajaan tarvittavia tietoja. 7d puristuskokeessa havaittua koekappaleiden jännitys-muodonmuutuskäyttäytymistä verrattiin kuvassa 26 esitettyyn sitkeään ja hauraan materiaalin jännitys-muodonmuutuskäyttäytymisen periaatekuvaan.



Kuva 26. Sitkeän ja hauraan materiaalin jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen (Harju 2017).

Kuvissa 26 ja 27 esitetyjä kuvaajia vertaillen voidaan havaita yhteneväisyys lentotuhkalla stabiloitujen ja Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitujen massojen sekä sitkeän materiaalin välillä. Myös sementtistabiloidun massan KS4 käyttäytyminen muistuttaa sitkeän materiaalin jännitys-muodonmuutoskäyttäytymistä. Sementtistabiloidun massan KS6, masuunikuonalla stabiloidun massan KM8A12 ja referenssimateriaalin MS4,5 kuvaajat ovat puutteellisia, sillä niitä ei saatu kuormitettua murtoon Lloydin puristuslaitteella.



Kuva 27. Jännitys-muodonmuutoskuvaajat 7d puristuskokeista Lloydin puristuslaitteesta.

Stabilointimassat käyttäytyivät eri tavoilla kuormitustilanteessa, ja sementtistabiloituun koekappaleeseen KS6 sekä masuunikuonalla stabiloituihin koekappaleisiin KM8A1 ja KM12A1 ei tullut juurikaan näkyviä vaurioita puristuskokeen aikana. Referenssimateriaaliin MS4,5, sementtistabiloituun massa KS4 sekä Ecolan Oy:n sideaineella stabiloituihin massoihin KE4 ja KE6 taas muodostui selkeitä halkeamia jo ennen murtumista. Näkyvimmin deformaatioivat lentotuhkalla stabiloidut massat KL50A1 ja KL50A3, joiden koekappaleista irtosi palasia puristuksen aikana.



Kuva 28. Koekappaleita 7d puristuskokeen jälkeen.

6.3 Pakkasrapautumiskestävyys

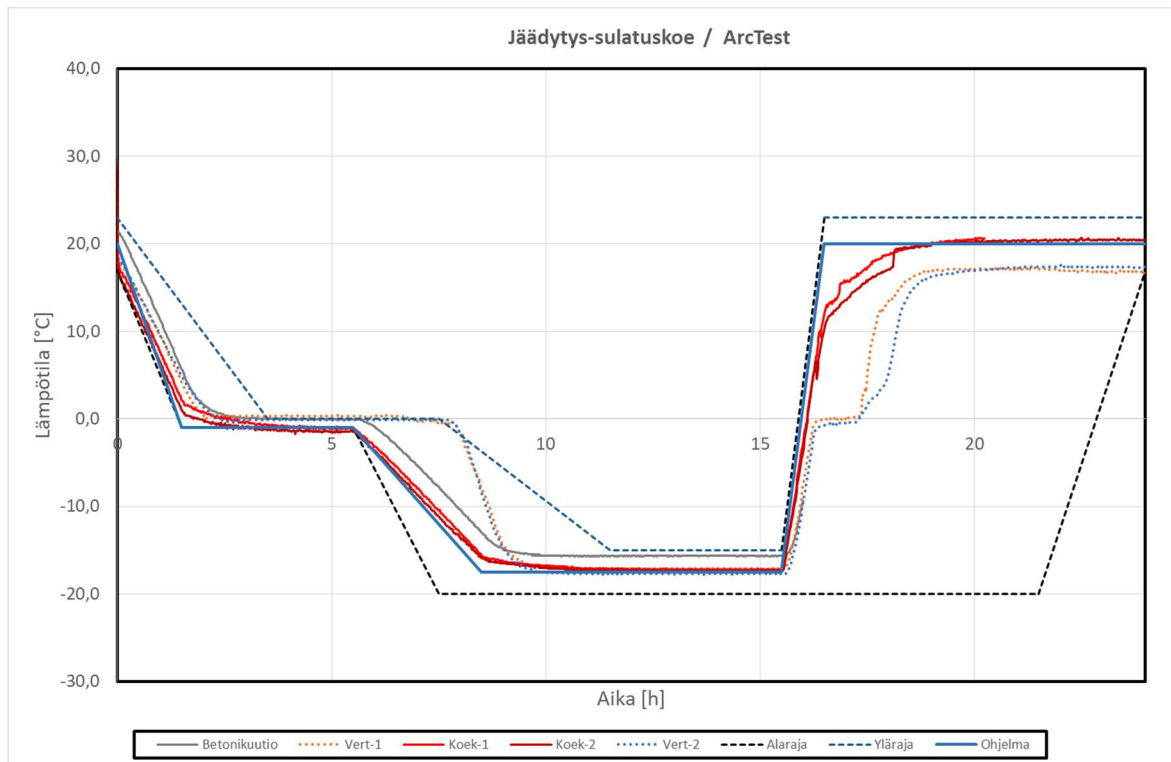
Stabilointimassojen pakkasrapautumiskestävyys määritettiin jäädytys-sulatuskokeen avulla. Jäädytys-sulatuskokeeseen valittiin 7d puristuslujuuden ja hinnan perusteella sementtistabiloitu massa KS4, lentotuhkalla stabiloitu massa KL50A3 ja Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6. Lisäksi jäädytys-sulatuskoe tehtiin referenssimateriaalille, eli massalle MS4,5. Kaikki massat täyttivät Tiehallinnon julkaisun Päälysrakenteen stabilointi (2007 b) asettamat vaatimukset, ja niiden pakkasrapautumiskestävydet olivat huomattavasti tavoitearvoa paremmat. Jäädytys-sulatuskokeen tulokset on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Jäädytys-sulatuskokeen tulokset.

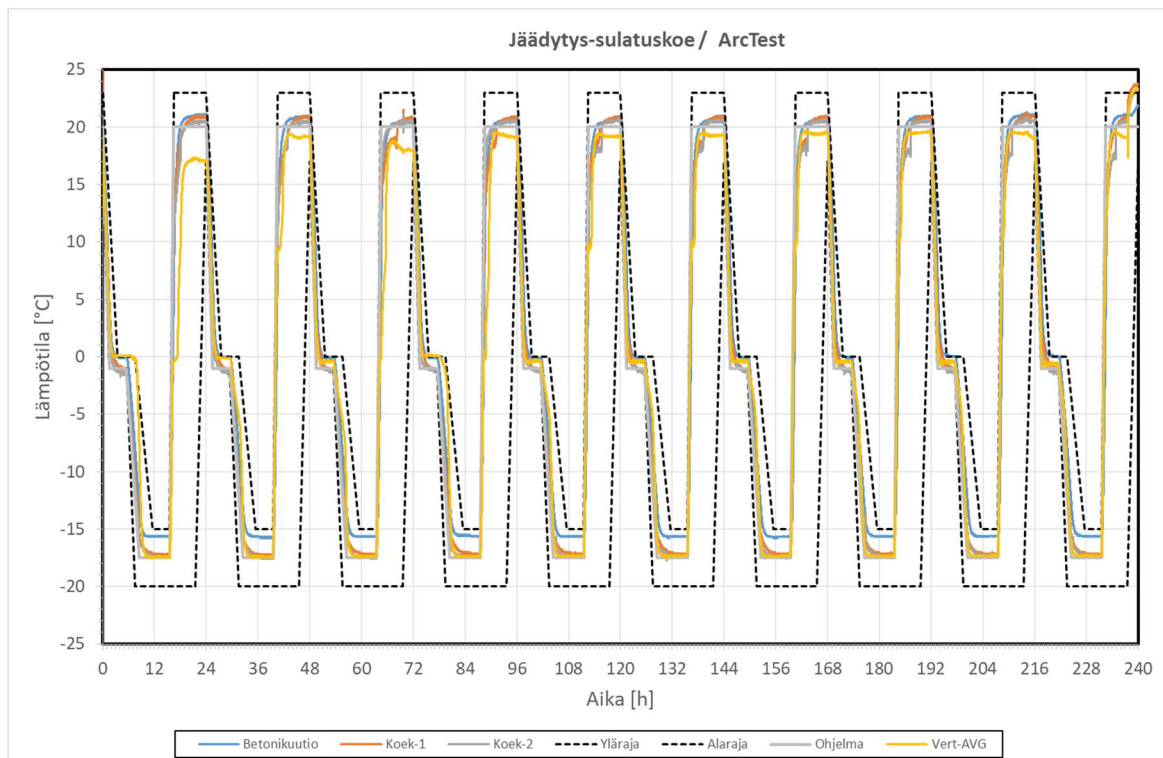
	Puristuslujuus SET A [MPa]	Puristuslujuus SET B [MPa]	Pakkasrapautumiskestävyys [%]
Vaatus			≥ 67
MS4,5	14,70	15,23	96,6
KS4	7,66	8,44	90,8
KL50A3	3,91	4,32	90,6
KE6	7,67	7,84	97,8

Pakkasrapautumiskestävyyttä tarkasteltaessa on kuitenkin huomioitava, että Tiehallinnon ohjeen Päälysrakenteen stabilointi (2007 b) vaatimukset on määritetty Päälystealan Neuvottelukunnan menetelmän PANK-4305 mukaisesti tehtävälle jäädytys-sulatuskokeelle. Tässä työssä käytetty CEN/TS 13286-54 mukainen menetelmä eroaa PANK:in menetelmästä siinä, että PANK:in menetelmän mukaan koekappaleet tulee olla vedessä sulatusjakson ajan, kun taas tässä työssä tehdyissä tutkimuksissa koekappaleita ei upotettu veteen sulamisjakson ajaksi, vaan kosteusolosuhteet olivat samat sekä jäädytys- että sulatusjakson aikana. Lisäksi PANK:in menetelmässä koekappaleet altistetaan 20 jäädytys-sulatussyklille 10 päivän aikana, kun taas CEN/TS 13286-54 mukaan syklejä on yksi päivässä. Jäädytys-sulatuskoe tehtiin tässä työssä teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 mukaan, sillä työtä varten ei ollut saatavilla PANK:in menetelmää varten tarvittavaa koelaitteistoa.

Kuvissa 28 ja 29 on esitetty yksi jäädytys-sulatussykli sekä kaikki kokeen aikana tehdyt kymmenen sykliä. Kuvaajat ovat jäädytys-sulatuskaapista, jossa koestettiin massan MS4,5 koekappaleet. Kokeen aikana lämpötilaa mitattiin kahdesta koekappaleesta, Koek-1 ja Koek-2, kahdesta vertailumassasta, Vert-1 ja Vert-2, sekä betonikuutiosta. Kuvaajassa on lisäksi esitetty teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 määrittämät koekappaleiden lämpötilan ylä- ja alarajat, sekä kaappiin asetettu lämpötilaohjelma.



Kuva 28. Jäädytys-sulatuskoe, yksi sykli.



Kuva 29. Jäädytys-sulatuskoe, kymmenen sykliä.

6.4 Stabilointimassojen hinnat

Puristuslujuuden ja pakkasrapautumiskestävyyden lisäksi eri stabilointimassoille laskettiin hinnat. Hinnat laskettiin ilman arvonlisäveroa (ALV 0 %), eikä niissä otettu huomioon kuljetus- tai valmistuskustannuksia. Hinnaltaan halvimmat massat olivat lentotuhkalla stabiloidut massat KL50A1 ja KL50A3, kun taas kalleimmat olivat referenssimateriaali MS4,5 ja masuunikuonalla stabiloitu massa KM12A1. Kun tarkasteltiin massojen hintoja 28d puristuslujuutta kohden, niin halvimmat massat olivat edelleen lentotuhkaa sisältävät massat, mutta kalleimmat olivat referenssimateriaali MS4,5 ja Ecolan Oy:n sideainetta sisältävä massa KE4. Massoista, jotka täyttivät puristuslujuuden vaatimukset sekä 7d että 28d puristuskokeessa, halvin oli Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6, kun taas kallein oli masuunikuonalla stabiloitu massa KM8A1. Kun vertailtiin massojen hintaa 28d puristuslujuutta kohden, niin puristuslujuuksien vaatimukset täyttävistä massoista halvin oli edelleen Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6, mutta kallein oli sementtistabiloitu massa KS4. Stabilointimassojen hinnat on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Stabilointimassojen hinnat (ALV 0 %, ei kuljetus- tai valmistuskustannuksia). Puristuslujuuksien vaatimukset täyttäneet massat korostettu harmaalla.

Massa	Hinta [€/tn]	Hinta [€/tn/MPa]
MS4,5	9,30	0,76
KS4	5,69	0,75
KS6	7,08	0,70
KL50A1	1,84	0,55
KL50A3	2,54	0,62
KM8A1	7,99	0,70
KM12A1	10,18	0,64
KE4	4,25	1,24
KE6	4,92	0,67

Hintoja vertaillessa on kuitenkin huomioitava, että kuljetuskustannukset muodostavat usein suuren osan hinnasta, ja tässä tutkimuksessa käytettyjen massojen osalta erityisesti sivutuotteiden osalta kuljetuksella voi olla merkittävä vaikutus tuotteen kokonaishintaan. Esimerkiksi massoissa KL50A1 ja KL50A3 käytetyn lentotuhkan hinta on laskettu 0 €/tn, mutta jos lentotuhkaa joudutaan kuljettamaan kauas voimalaitokselta, kuljetuksesta joutuu maksamaan. Lisäksi on huomioitava, että massoissa KE4 ja KE6 käytetty hinta Ecolan Oy:n sideaineelle on valmistajan ilmoittama arvio. Stabilointimassoissa käytettyjen materiaalien yksikköhinnat on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Materiaalien yksikköhinnat.

Materiaali	Hinta	Yksikkö	Lähde
KaM 0/32	6,20	€/tn	Mattsson (2018)
KaM 0/3	3,00	€/tn	Mattsson (2018)
Plussementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	80,00	€/tn	Ruokonen (2018)
Lentotuhka, biopolttoaineet	0,00	€/tn	Immonen (2018)
Masuunikuonajauhe KJ400	65,00	€/tn	Ruokonen (2018)
Ecolan Oy:n uusiosideaine	40,00	€/tn	Hintikka (2018)
Vesi	1,14	€/m ³	HSY (2018)

6.5 Tulosten yhteenveto

Kaikki tutkimuksessa käytetyt stabilointimassat, joille tehtiin jäädytys-sulatuskoe, täyttivät pakkasrapautumiskestävyyden vaatimukset. Puristuslujuuden osalta sementtistabiloitu massa KS4, lentotuhkalla stabiloitu massa KL50A3, masuunikuonalla stabiloitu massaa KM8A1 sekä Ecolan Oy:n sideainetta sisältävä massa KE6 täyttivät 7d puristuslujuuden vaatimukset. 28 d puristuslujuuden vaatimukset taas täyttivät referenssimateriaali MS4,5, sementtistabiloidut massat KS4 ja KS6, masuunikuonalla stabiloitu massa KM8A1 sekä Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6. Vain sementtistabiloitu massa KS4, masuunikuonalla stabiloitu massa KM8A1 ja Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6 täyttivät vaatimukset sekä 7d että 28d puristuskokeessa. Massat, joiden runkoaineena käytettiin kivituhkaa, olivat edullisempia kuin referenssimateriaali, lukuun ottamatta masuunikuonaa sisältävää massaa KM12A1. Kun tarkasteltiin stabilointimassojen hintaa suhteessa saavutettuun 28d puristuslujuuteen, niin kivituhkaa sisältävät massat olivat halvempia kuin referenssimateriaali, lukuun ottamatta Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitua massaa KE4.

Tutkimustulosten perusteella onnistuneimmat massat olivat sementtistabiloitu massa KS4 ja Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6, jotka sekä täyttivät Tiehallinnon julkaisun Päälysrakenteen Stabilointi (2007 b) vaatimukset, että olivat edullisempia kuin referenssimateriaali MS4,5. Myös masuunikuonalla stabiloitu massa KM8A1 täytti vaatimukset puristuslujuuksien osalta, mutta massalle ei tehty jäädytys-sulatuskoetta. Stabilointimassoille tehtyjen tutkimusten tulokset on koottu taulukkoon 17.

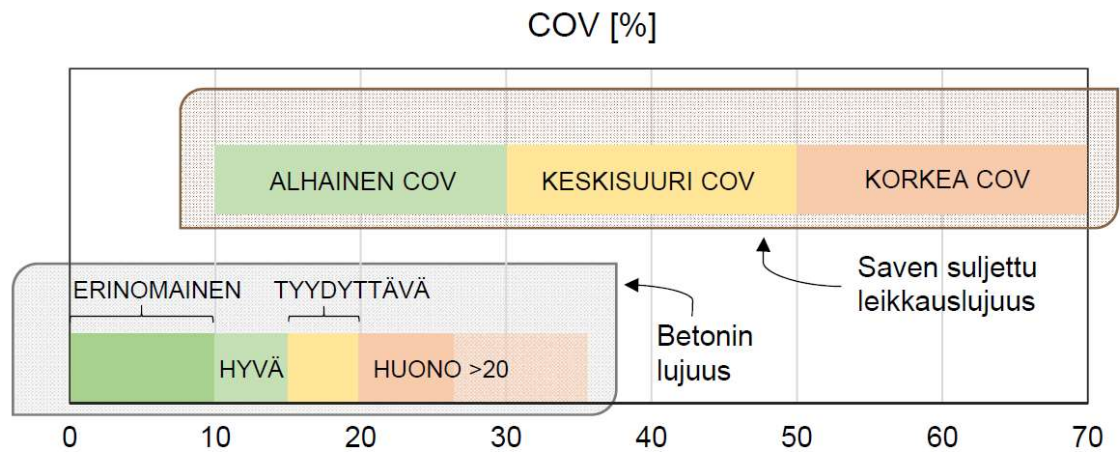
Taulukko 17. Laboratoriokokeiden yhteenvedo ja stabilointimassojen hinnat (ALV 0 %, ei kuljetus- tai valmistuskustannuksia).

	Puristuslujuus 7d [MPa]	Puristuslujuus 28d [MPa]	Pakkasrapautumis- kestävyys [%]	Hinta [€/tn]
Tavoitearvot	3 - 8	5 - 13	≥ 67	
MS4,5	13,91	12,29	96,6	9,30
KS4	5,02	7,59	90,8	5,69
KS6	8,31	10,17	-	7,08
KL50A1	2,59	3,34	-	1,84
KL50A3	3,09	4,09	90,6	2,54
KM8A1	7,76	11,47	-	7,99
KM12A1	9,79	15,96	-	10,18
KE4	2,17	3,42	-	4,25
KE6	3,40	7,36	97,8	4,92

6.6 Tulosten luotettavuus

Geoteknisen suunnittelun suurimpiin haasteisiin kuuluu maa-aineksen ominaisuuksiin liittyvä epävarmuus. Maa-aineksen luonnollisen vaihtelun sekä pienen koehavaintomäärän seurauksena havainnoissa on usein suurta hajontaa. Materiaalin ominaisuuksiin liittyvää epävarmuutta kuvataan variaatiokertoimella COV, joka määritetään kaavan 6 mukaisesti. Suuri COV merkitsee suurta hajontaa, kun taas alhainen COV merkitsee pientä hajontaa. (Korkiala-Tanttu & Löfman 2016.) Saven suljetun leikkauslujuuden ja betonin lujuuden variaatiokertoimen luokitukset on esitetty kuvassa 30.

$$COV = \frac{\text{keskihajonta}}{\text{keskiarvo}} \quad (6)$$



Kuva 30. Saven ja betonin lujuuden variaatiokertoimen luokitukset (Korkiala-Tanttu & Löfman 2016).

Tässä tutkimuksessa laskettiin variaatiokertoimet jokaiselle kokeelle, ja variaatiokertoimet olivat välillä 0 ... 11 %. Variaatiokertoimet on esitetty taulukossa 18. Variaatiokertoimien luokituksen mukaan voidaan todeta, että tutkimuksessa tehtyjen koetulosten hajonta oli pientä ja tuloksien luotettavuus on erinomainen.

Taulukko 18. Koetulosten variaatiokertoimet.

Massa	COV puristuskokeet [%]		COV jäädytys-sulatuskoe [%]	
	7d	28d	SET A	SET B
MS4,5	0,68	8,13	5,26	8,65
KS4	2,74	5,49	4,92	2,09
KS6	3,47	7,09	-	-
KL50A1	5,90	3,99	-	-
KL50A3	2,60	2,46	1,59	2,12
KM8A1	10,58	3,89	-	-
KM12A1	1,52	4,60	-	-
KE4	1,54	2,85	-	-
KE6	9,42	2,07	1,40	2,97

7 Johtopäätökset

Tutkimuksessa onnistuttiin valmistamaan kaksi eri stabilointimassaa, joiden runkoaineena oli kivituhka 0/3, ja jotka täyttivät Tiehallinnon julkaisun Päälyysrakenteen stabilointi (2007 b) vaatimukset tutkimuksessa tehtyjen kokeiden osalta. Kivituhka soveltuu siis tässä tutkimuksessa tutkittujen ominaisuuksien osalta stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineeksi, jos sen kanssa käytetään sopivaa sideainetta ja sideainepitoisuutta, ja jos massan kosteus sekä tiiveys ovat suunnitelmien mukaiset. On kuitenkin huomioitava, että tutkimuksessa tehtiin rajallinen määrä sekä kokeita että koekappaleita, ja jatkossa tulisi tutkia muun muassa kivituhkaa sisältävien stabilointimassojen käyttäytymistä routimisen sekä syklisen kuormituksen alaisena. Jatkotutkimuksiin soveltuvia kokeita ovat esimerkiksi routanousukoe sekä syklinen kolmiaksiaalioke.

Tutkimuksessa onnistuneimmat stabilointimassat olivat sementtistabiloitu massa KS4, jonka sideainepitoisuus oli 4 %, ja Ecolan Oy:n sideaineella stabiloitu massa KE6, jonka sideainepitoisuus oli 6 %. Kyseiset stabilointimassat täyttivät Tiehallinnon julkaisun Päälyysrakenteen stabilointi (2007 b) vaatimukset ja olivat edullisempia kuin referenssimateriaali massa MS4,5. Vaikka massat täyttivät stabilointiohjeen vaatimukset, jatkotutkimuksia tarvitaan myös kyseisten massojen osalta. Laboratoriossa saadaan optimiolosuhteissa usein hyviä tuloksia, mutta niiden saavuttaminen kenttäolosuhteissa voi olla vaikeaa. Stabiloidun lopputuotteen laatuun vaikuttavat merkittävästi materiaalien laatu sekä työnaikainen massan kosteuspiitoisuus ja tiivistyminen. Jatkossa olisikin tärkeää tutkia materiaalien laadunvaihtelun, kosteusolosuhteiden sekä mahdollisen heikon tiivistymisen vaikutuksia stabilointimassojen käyttäytymiseen. Lisäksi kivituhkaa ja uusiomateriaaleja sisältävien stabilointimassojen pitkäaikaiskäyttäytyminen vaatii jatkotutkimuksia, sillä luonnonmateriaaleja varten kehitetyt kokeet eivät välttämättä kuvaa uusiomateriaalien käyttäytymistä.

Tiehallinnon Päälyysrakenteen stabilointiohjeen (2007 b) puristuslujuuden vaatimukset täytävissä massoissa KS4, KM8A1 ja KE6 käytettiin sideaineina sementtiä (KS4), masuunikuonaa (MS8A1) ja Ecolan Oy:n sideainetta (KE6). Tämän tutkimuksen tulosten perusteella voidaan siis olettaa, että kivituhkaa on mahdollista käyttää runkoaineena sidotussa kantavassa kerroksessa erilaisten sideaineiden kanssa. Tutkimuksessa käytetty sementtistabiloinnin suhteitus onnistui hyvin, ja 4 % sideainepitoisuudella saavutettiin haluttuja tuloksia. Lentotuhkalla stabiloidut massat eivät täyttäneet stabilointiohjeen vaatimuksia, mutta ne olivat selkeästi edullisimpia kuin muut seokset. Lentotuhkaa sisältävien stabilointimassojen osalta kannattaisikin tutkia aktivaattorin määrän vaikutusta massan käyttäytymiseen, sillä massa KL50A3 täytti pakkasrapautumiskestävyyden vaatimukset sekä puristuslujuuden vaatimukset 7d puristuskokeen osalta. Aktivaattoria lisäämällä voitaisiin päästä ohjealueelle myös 28d puristuksessa. Lentotuhkalla stabiloidut massat olivat tutkimuksen perusteella edullisimpia, minkä lisäksi niiden kehittäminen olisi tärkeää myös sen takia, että teollisuuden tuhkat ovat kaatopaikkoja merkittävästi kuormittava jäte. Masuunikuonalla stabiloiduista massoista toisen puristuslujuudet olivat ohjealueella, mutta toinen lujittui liikaa. Kuitenkin myös ohjealueella olevan massan puristuslujuudet olivat ohjealueen yläpäässä, ja sideainetta ei välttämättä tarvitsisi niin paljon. Masuunikuonaa sisältävien massojen taloudellisuutta voisikin parantaa vähentämällä sideaineen määrää. Lisäksi masuunikuonaa voisi olla mahdollista käyttää myös ilman aktivaattoria. Ecolan Oy:n sideainetta sisältävien massojen suhteitus onnistui, ja 6 % sideainepitoisuudella saavutettiin tavoitearvot. Lujuudet oli-

vat kuitenkin tavoitearvojen alapäässä, ja Ecolan Oy:n sideainetta voisikin käyttää stabilointimassassa hieman enemmän. Suhteituksen optimoinnin lisäksi olisi tärkeää tutkia kaikkien massojen osalta massan herkkyyttä sideaineen määrän vaihteluille.

Tässä työssä tutkittiin kivituhkaa sisältävien stabilointimassojen ominaisuuksia, mutta jatkossa tulisi tutkia myös stabilointimassojen käyttäytymistä tien päällysrakenteessa. Jotta kivituhkaa sisältäviä stabilointimassoja voitaisiin käyttää tien päällysrakenteessa, tulee varmistaa muiden tien rakennekerrosten yhteensopivuus kivituhkaa sisältävän stabiloidun kantavan kerroksen kanssa. Esimerkiksi sopivan asfalttityypin valitseminen sekä asfaltin ja kantavan kerroksen riittävän liimautumisen varmistaminen ovat tärkeitä osa-alueita päällysrakenteen toiminnan kannalta. Jatkossa tulisikin selvittää, asettaako kivituhkaa sisältävä stabiloitu kantava kerros erityisiä vaatimuksia muille tien rakennekerroksille.

Lähdeluettelo

- Aalto-yliopisto. 2018. Concrete Technology. Lecture notes prepared by D.Sc. Fahim Al-Neshawy. [Viitattu 4.4.2018] Saatavissa: <https://mycourses.aalto.fi/course/view.php?id=16861§ion=1>
- Doré, G. & Zubeck, H. 2009. Cold Regions Pavement Engineering. American Society of Civil Engineers. Reston, United States of America. ISBN: 978-0-07-160088-0
- Eerola, M. 2001. Uusiomateriaalien käyttö maarakentamisessa. Rakennustieto. [Viitattu 27.3.2018] Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK020403.pdf>
- Finn Ash-Power Oy. 2018. Ash-Power, Käyttökohteet. [Viitattu 27.3.2018] Saatavissa: <https://www.ashpower.fi/#kayttokohteet>
- Finnsementti Oy. 2015. KJ400 Masuunikuonajauhe. Tuote-esite. [Viitattu 5.3.2018] Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/test/kj400_1_15112017_202303.pdf
- Finnsementti Oy. 2018. Plussementti. Tuote-esite. [Viitattu 11.3.2018] Saatavissa: http://www.finnsementti.fi/fsproductdb/files/test/plussementti_1_13022018_092454.pdf
- Harju, I. 2017. Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu, Helsinki.
- HSY. 2018. Vesihuollon hinnasto. [Viitattu 24.4.2018] Saatavissa: https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/HSYn_vesihuollon_hinnasto_2018_su_WEB.pdf
- Hudson, W., Little, D., Razmi, A., Anderson, V. & Weissmann, A. 1997. An Investigation of By-Product Fines in the United States. Research report ICAR-101-1. International Center for Aggregates Research, The University of Texas at Austin. [Viitattu 23.2.2018]. Saatavissa: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/35314>
- InfraRYL. 2017. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Päällys- ja pintarakenteet. Rakennustieto Oy. Suomi. ISBN: 978-952-267-213-1
- Jarva, J. 2011. Ratsastuskenttien pohjamateriaalit. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu. Mustiala, Suomi.
- Kolisoja, P. 1997. Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials. Doctoral Thesis. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere, Suomi.
- Korkiala-Tanttu, L. 2008. Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials. Väitöskirja. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi. ISBN: 978-951-38-7136-9
- Korkiala-Tanttu, L. & Löfman, M. 2016. Luotettavuuden arviointi ja riskienhallinta geoteknisessä suunnittelussa. Liikennevirasto. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-318-7

Korpijärvi, K., Mroueh, U-M., Merta, E., Laine-Ylijoki, J., Kivikoski, H., Järvelä, E., Wahlström, M. & Mäkelä, E. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön. Edita Prima Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-951-38-7317-2

Lahtinen, P., Kolisoja, P., Kuula-Väisänen, P., Leppänen, M., Jyrävä, H., Maijala, A. & Ronkainen, M. 2005. UUMA-esiselvitys. Ympäristöministeriö. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-731-354-3

Lemminkäinen Infra Oy. 2017. KaM 0/32 ja KaM 0/3 CE-merkit ja suoritustasoilmoitukset.

Liikennevirasto. 2016. Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen. Liikennevirasto. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-340-8

Liikennevirasto. 2018. Tierakenteen suunnittelu. Liikennevirasto. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-317-xxx-x

Manning, D. 2004. Exploitation and Use of Quarry Fines. Report No. 087/MIST2/DACM/01. Mineral solution Ltd, United Kingdom. [Viitattu 23.2.2018], Saatavissa: <http://www.katlapumice.com/mist/mist2.pdf>

Mitchell, C., Mitchell P. & Pascoe, R. 2008. Quarry fines minimization: Can we really have 10 mm aggregate with no fines? In: Walton, Geoffrey. Proceedings of the 14th Extractive industry geology conference. EIG Conferences. [Viitattu 23.2.2018]. Saatavissa: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/4932>

Mitchell, C. 2009. Quarry Fines and Waste. In: Quarries & Mines 2009. [Viitattu 23.2.2018]. Saatavissa: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/6290>

Mäkelä, H. & Höynälä, H. 2000. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. Tekes. Helsinki, Suomi. ISBN: 952-9621-97-3

PANK. Päällystealan Neuvottelukunta. 2017. Asfalttinormit 2017. Premedia Helsinki Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-952-99985-2-4

Pitkänen, I-J. 2015. Selvitys Destia Oy: kivituhkamääristä ja kivituhkan nykyisistä ja uusista käyttömahdollisuuksista. Opinnäytetyö. Savonia-ammattikorkeakoulu. Kuopio, Suomi.

Ramboll Finland Oy. 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja. [Viitattu 2.3.2018] Saatavissa: https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

Rasmus, R. 2014. Kivituhkan hyödyntäminen massastabiloinnissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere, Suomi.

Rudus Oy. 2008. Lentotuhkaohje. [Viitattu 2.3.2018] Saatavissa: <http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=0ahUKEwiL-KKroc7ZAhW0h6YKHeFjAd8QFghFMAY&url=http%3A%2F%2Fwww.rudus.fi%2FDownload%2F24033%2FLentotuhka-ohje.pdf&usg=AOvVaw2hLScWWOc-bRICbFkIEdBGw>

- Sævarsdóttir, Þ. 2014. Performance Modelling of Flexible Pavements Tested in a Heavy Vehicle Simulator. University of Iceland. Reyjavik, Iceland. ISBN: 978-9935-9146-7-5
- Salour, F. 2015. Moisture Influence on Structural Behaviour of Pavements. Doctoral Thesis. KTH, Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- Tammirinne, M. 2002. Tierakenteen suunnittelu ja mitoitus. TPPT-suunnittelujärjestelmän kuvaus. Oy Edita Ab. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-726-868-8
- Thom, N. 2008. Principles of pavement engineering. Thomas Telford Publishing Ltd. London, United Kingdom. ISBN: 978-0-7277-3480-8
- Tiehallinto. 2002. Stabilointiohje. Edita Prima Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-726-843-2
- Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu. Edita Prima Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-803-402-8
- Tiehallinto. 2007 a. Kerrostabilointien kehitysprojekti INFRA-STABIL. Edita Prima Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-951-803-966-5
- Tiehallinto. 2007 b. Päälysrakenteen stabilointi. Edita Prima Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-951-803-970-2
- Tiehallinto. 2007 c. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Edita Prima Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 978-951-803-632-9
- Tielaitos. 1993. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Yleiset perusteet. Tielaitos. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-47-7420-5
- Tielaitos. 1997. Selvitys maabetonirakenteen ja bitumilla sidotun päällysteen yhteistoiminnasta. Tielaitos. Helsinki, Suomi.
- Tielaitos. 2000. Masuunihiekkastabilointi. Edita Prima Oy. Helsinki, Suomi. ISBN: 951-726-656-1
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2015. Kiviaines- ja luonnonkiviteollisuuden kehitysnäkymät. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 54/2015. ISBN: 978-952-327-048-0
- VNa 834/2017. 2017. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. [Viitattu 2.3.2018] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>
- Wassholm, N. 2008. Kompostin jälkikypsytyksen tehostaminen ja hallinta. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu. Lahti, Suomi.

Haastattelut

Hintikka, M. 2018. Liiketoimintapäällikkö. Ecolan Oy. Haastattelut 24.4.2018 ja 8.5.2018.

Immonen, J. 2018. Construction Manager. YIT Infra Oy. Haastattelu 22.3.2018

Korkiala-Tanttu, L. 2018. Professori. Aalto-yliopisto. Haastattelu 6.4.2018.

Mattsson, K. 2018. Commodity Manager. YIT Infra Oy. Haastattelu 22.3.2018

Onnela, T. 2018. Information Management Manager. YIT Infra Oy. Haastattelu 7.3.2018.

Ruokonen, S. 2018. Asiakastukipäällikkö. Finnsementti Oy. Haastattelu 26.3.2018

Liiteluettelo

Liite 1. Kokeiden pöytäkirjat. 18 sivua.

Liite 2. KaM 0/32 CE-merkki ja suoritustasoilmoitus. 3 sivua.

Liite 3. KaM 0/3 CE-merkki ja suoritustasoilmoitus. 3 sivua.

Liite 4. Plussementti CEM II / B-M (S-LL) 42,5 N CE-merkki ja suoritustasoilmoitus. 4 sivua.

Liite 5. Masuunikuonajauhe KJ400 CE-merkki ja suoritustasoilmoitus. 3 sivua.

[illegible]

Pakkasrapautumiskestävyys	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm ³]	Tiheys [g/dm ³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
SET A	8	6252,0	150,7	150,0	2663089	2348	260,95	14,77
	9	6234,3	150,4	150,0	2657787	2346	245,66	13,90
	10	6233,2	150,7	150,0	2663089	2341	272,92	15,44
	KA.							14,70
	COV							5,26 %
SET B	13	6260,4	150,9	150	2666623	2348	285,55	16,16
	14	6229,4	150,8	150	2664856	2338	220,40	12,47
	15	6237,7	150,6	150	2661322	2344	252,64	14,30
	KA.							15,23
	COV							8,65 %
SET A / SET B								0,97

* KPL 14 poistettu tuloksista, puristuspinta-alasta puuttui pala

Puristuslujuus 7d:	5,02 MPa	14.3.2018			
Puristuslujuus 28d:	7,59 MPa	4.4.2018			
Pakkarapautumiskestävyyys:	90,81 %	6.4.2018	-	16.4.2018	17.4.2018

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]
Puristuslujuus 7d	1	1762,8	100,9	100,0	792467	2224
	2	1742,3	100,8	100,0	791681	2201
	3	1764,4	101,2	100,0	794823	2220
Puristuslujuus 28d	4	1762,2	100,9	100,0	792467	2224
	5	1767,3	101,3	100,0	795608	2221
	6	1755,7	100,7	100,0	790896	2220
Pakraspautumiskestävyys SET A	7	1759,7	101,2	100,0	794823	2214
	8	1756,2	100,8	100,0	791681	2218
	10	1756,4	100,5	100,0	789325	2225
Pakraspautumiskestävyys SET B	11	1756,8	100,8	100,0	791681	2219
	12	1756,9	100,4	100,0	788540	2228
	13	1757,6	100,8	100,0	791681	2220
Varakappaleet	14	1753,8	100,7	100,0	790896	2217
	15	1752,7	100,6	100,0	790111	2218
	16	1752,4	100,4	100,0	788540	2222

[illegible][illegible]

[illegible]

Massa:	KS6
Runkoaine:	Kivituhka 0-3, Malmgård
Sideaine:	Plussementti, Finnsementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5
Sideaineen määrä:	6,0 %
Aktivaattori:	-
Aktivaattorin määrä:	0,0 %
Tavoiteltu kosteus:	10,7 %
Mitattu kosteus:	9,9 %
Valmistus pvm:	7.3.2018

Puristuslujuus 7d:	8,31 MPa	14.3.2018
Puristuslujuus 28d:	10,17 MPa	4.4.2018
Pakkasrapautumiskestävyys:	-	

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]
Puristuslujuus 7d	1	1783,9	100,8	100,0	791681	2253
	2	1785,5	100,8	100,0	791681	2255
	3	1786,8	100,9	100,0	792467	2255
Puristuslujuus 28d	4	1783,0	100,7	100,0	790896	2254
	5	1785,4	100,8	100,0	791681	2255
	6	1782,8	100,9	100,0	792467	2250
Pakkasrapautumiskestävyys SET A	7	1782,8	100,7	100,0	790896	2254
	8	1778,3	100,7	100,0	790896	2248
	9	1782,0	100,9	100,0	792467	2249
Pakkasrapautumiskestävyys SET B	10	1693,5	100,0	100,0	785398	2156
	11	1782,6	100,8	100,0	791681	2252
	12	1782,9	101,0	100,0	793252	2248
Varakappaleet	13	1783,3	100,9	100,0	792467	2250
	14	1781,0	100,7	100,0	790896	2252
	15	1780,1	100,8	100,0	791681	2249

Puristuslujuus 7d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	1	1764,4	101,2	100,0	794823	2220	67,81	8,63
	2	1764,5	101,2	100,0	794823	2220	64,49	8,21
	3	1767,1	101,2	100,0	794823	2223	63,49	8,08
	KA.						8,31	
	COV						3,47 %	

Puristuslujuus 28d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	4	1760,6	100,9	100,0	792467	2222	85,76	10,92
	5	1764,4	101,0	100,0	793252	2224	79,45	10,12
	6	1761,9	101,2	100,0	794823	2217	74,46	9,48
	KA.						10,17	
	COV						7,09 %	

Massa:	KL50A1
Runkoaine:	Kivituhka 0-3, Malmgård
Sideaine:	Lentotuhka, Elenia
Sideaineen määrä:	50,0 %
Aktivaattori:	Plussementti, Finnsementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5
Aktivaattorin määrä:	1,0 %
Tavoiteltu kosteus:	15,0 %
Mitattu kosteus:	13,9 %
Valmistus pvm:	8.3.2018

Puristuslujuus 7d:	2,59 MPa	15.3.2018
Puristuslujuus 28d:	3,34 MPa	5.4.2018
Pakkasrapautumiskestävyys:	-	

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]
Puristuslujuus 7d	1	1320,7	100,8	100,0	791681	1668
	2	1324,6	100,8	100,0	791681	1673
	3	1328,7	101,1	100,0	794038	1673
Puristuslujuus 28d	4	1326,1	101,1	100,0	794038	1670
	5	1326,0	101,1	100,0	794038	1670
	6	1327,7	101,0	100,0	793252	1674
Pakkasrapautumiskestävyys SET A	7	1331,4	101,3	100,0	795608	1673
	8	1330,9	101,3	100,0	795608	1673
	9	1326,3	101,2	100,0	794823	1669
Pakkasrapautumiskestävyys SET B	10	1326,8	101,1	100,0	794038	1671
	11	1328,5	101,2	100,0	794823	1671
	12	1328,1	101,1	100,0	794038	1673
Varakappaleet	13	1328,6	101,1	100,0	794038	1673
	14	1328,8	101,1	100,0	794038	1673
	15	1326,8	101,3	100,0	795608	1668

Puristuslujuus 7d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	1	1301,5	100,9	100,0	792467	1642	18,96	2,41
	2	1306,3	101,0	100,0	793252	1647	20,86	2,66
	3	1311,6	101,2	100,0	794823	1650	21,18	2,70
	KA.						2,59	
	COV						5,90 %	

Puristuslujuus 28d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	4	1301,2	101,0	100,0	793252	1640	25,26	3,22
	5	1300,8	101,2	100,0	794823	1637	27,33	3,48
	6	1303,6	101,5	100,0	797179	1635	26,04	3,32
	KA.						3,34	
	COV						3,99 %	

Massa:	KL50A3
Runkoaine:	Kivituhka 0-3, Malmgård
Sideaine:	Lentotuhka, Elenia
Sideaineen määrä:	50,0 %
Aktivaattori:	Plussementti, Finnsementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5
Aktivaattorin määrä:	3,0 %
Tavoiteltu kosteus:	15,0 %
Mitattu kosteus:	14,1 %
Valmistus pvm:	8.3.2018

Puristuslujuus 7d:	3,09 MPa	15.3.2018			
Puristuslujuus 28d:	4,09 MPa	5.4.2018			
Pakkarapautumiskestävyys:	90,56 %	6.4.2018	-	16.4.2018	17.4.2018

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]
Puristuslujuus 7d	1	1334,1	101,2	100,0	794823	1678
	2	1331,6	101,1	100,0	794038	1677
	3	1334,7	101,3	100,0	795608	1678
Puristuslujuus 28d	4	1332,7	101,1	100,0	794038	1678
	5	1335,3	101,1	100,0	794038	1682
	6	1332,8	101,1	100,0	794038	1679
Pakkasrapautumiskestävyys SET A	7	1334,9	101,1	100,0	794038	1681
	8	1335,1	101,1	100,0	794038	1681
	9	1331,0	100,8	100,0	791681	1681
Pakkasrapautumiskestävyys SET B	10	1330,1	101,2	100,0	794823	1673
	11	1332,5	100,9	100,0	792467	1681
	12	1332,8	101,0	100,0	793252	1680
Varakappaleet	13	1335,1	100,9	100,0	792467	1685
	14	1335,5	101,2	100,0	794823	1680
	15	1332,2	100,9	100,0	792467	1681

[illegible][illegible]

Pakkasrapautumiskestävyys	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
SET A	7	1311,7	100,7	100,0	790896	1658	31,22	3,98
	8	1317,8	100,9	100,0	792467	1663	30,59	3,89
	9	1314,9	100,8	100,0	791681	1661	30,26	3,85
	KA.							3,91
	COV							1,59 %
SET B	10	1302,7	101,1	100	794038	1641	33,50	4,27
	11	1306,6	100,9	100	792467	1649	33,45	4,26
	12	1309,4	101	100	793252	1651	34,72	4,42
	KA.							4,32
	COV							2,12 %
SET A / SET B								0,91

Massa:	KM8A1
Runkoaine:	Kivituhka 0-3, Malmgård
Sideaine:	Masuunikuona, Finnsementti KJ400
Sideaineen määrä:	8,0 %
Aktivaattori:	Plussementti, Finnsementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5
Aktivaattorin määrä:	1,0 %
Tavoiteltu kosteus:	10,7 %
Mitattu kosteus:	10,1 %
Valmistus pvm:	7.3.2018

Puristuslujuus 7d:	7,76 MPa	14.3.2018
Puristuslujuus 28d:	11,47 MPa	4.4.2018
Pakkasrapautumiskestävyys:	-	

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]
Puristuslujuus 7d	1	1795,6	100,9	100,0	792467	2266
	3	1795,1	101,2	100,0	794823	2258
	13	1797,3	101,0	100,0	793252	2266
Puristuslujuus 28d	4	1790,4	101,0	100,0	793252	2257
	5	1795,0	100,8	100,0	791681	2267
	7	1793,1	101,0	100,0	793252	2260
Pakkasrapautumiskestävyys SET A	8	1794,7	101,2	100,0	794823	2258
	9	1800,9	101,1	100,0	794038	2268
	10	1797,8	101,0	100,0	793252	2266
Pakkasrapautumiskestävyys SET B	11	1793,2	101,0	100,0	793252	2261
	12	1792,4	100,8	100,0	791681	2264
	14	1790,1	100,8	100,0	791681	2261
Varakappaleet	2	1792,7	100,9	100,0	792467	2262
	6	1705,8	99,9	100,0	784613	2174
	15	1794,3	100,8	100,0	791681	2266

Puristuslujuus 7d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	1	1779,6	101,5	100,0	797179	2232	64,16	8,17
	3	1779,0	101,5	100,0	797179	2232	65,15	8,30
	13	1787,9	102,0	100,0	801106	2232	53,52	6,81
	KA.						7,76	
	COV						10,58 %	

Puristuslujuus 28d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	4	1773,6	101,2	100,0	794823	2231	86,76	11,05
	5	1778,6	101,7	100,0	798750	2227	89,75	11,43
	7	1780,0	101,5	100,0	797179	2233	93,74	11,94
	KA.						11,47	
	COV						3,89 %	

Massa:	KM12A1
Runkoaine:	Kivituhka 0-3, Malmgård
Sideaine:	Masuunikuona, Finnsementti KJ400
Sideaineen määrä:	12,0 %
Aktivaattori:	Plussementti, Finnsementti CEM II/B-M (S-LL) 42,5
Aktivaattorin määrä:	1,0 %
Tavoiteltu kosteus:	10,7 %
Mitattu kosteus:	10,6 %
Valmistus pvm:	8.3.2018

Puristuslujuus 7d:	9,79 MPa	15.3.2018
Puristuslujuus 28d:	15,96 MPa	5.4.2018
Pakkasrapautumiskestävyys:	-	

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]
Puristuslujuus 7d	1	1806,2	100,7	100,0	790896	2284
	2	1805,7	100,3	100,0	787754	2292
	3	1806,9	100,3	100,0	787754	2294
Puristuslujuus 28d	4	1805,1	100,5	100,0	789325	2287
	5	1804,4	100,7	100,0	790896	2281
	6	1803,1	100,7	100,0	790896	2280
Pakkasrapautumiskestävyys SET A	7	1805,0	100,8	100,0	791681	2280
	8	1804,6	100,7	100,0	790896	2282
	9	1803,3	100,8	100,0	791681	2278
Pakkasrapautumiskestävyys SET B	10	1801,2	100,7	100,0	790896	2277
	12	1798,0	100,7	100,0	790896	2273
	13	1802,5	100,8	100,0	791681	2277
Varakappaleet	11	1745,0	99,9	100,0	784613	2224
	14	1802,1	101,1	100,0	794038	2270
	15	1798,2	101,0	100,0	793252	2267

Puristuslujuus 7d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	1	1787,7	100,9	100,0	792467	2256	78,12	9,95
	2	1786,4	100,7	100,0	790896	2259	75,79	9,65
	3	1786,9	100,8	100,0	791681	2257	76,79	9,78
	KA.						9,79	
	COV						1,52 %	

Puristuslujuus 28d	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]	Lujuus [kN]	Lujuus [MPa]
	4	1791,5	101,2	100,0	794823	2254	130,31	16,59
	5	1791,4	100,9	100,0	792467	2261	126,65	16,13
	6	1786,5	100,8	100,0	791681	2257	119,01	15,15
	KA.						15,96	
	COV						4,60 %	

Massa:	KE4
Runkoaine:	Kivituhka 0-3, Malmgård
Sideaine:	Ecolan uusiosideaine, toimitettu 9.3.2018
Sideaineen määrä:	4,0 %
Aktivaattori:	-
Aktivaattorin määrä:	0,0 %
Tavoiteltu kosteus:	10,7 %
Mitattu kosteus:	10,4 %
Valmistus pvm:	12.3.2018

Puristuslujuus 7d:	2,17 MPa	19.3.2018
Puristuslujuus 28d:	3,42 MPa	9.4.2018
Pakkasrapautumiskestävyyys:	-	

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm³]	Tiheys [g/dm³]
Puristuslujuus 7d	3	1705,1	99,9	100,0	784613	2173
	4	1711,2	100,2	100,0	786969	2174
	6	1707,5	100,0	100,0	785398	2174
Puristuslujuus 28d	7	1712,8	100,3	100,0	787754	2174
	8	1710,1	99,9	100,0	784613	2180
	10	1708,1	100,1	100,0	786184	2173
Pakraspautumiskestävyys SET A	9	1704,0	100,3	100,0	787754	2163
	11	1711,4	100,2	100,0	786969	2175
	12	1713,6	100,2	100,0	786969	2177
Pakraspautumiskestävyys SET B	13	1710,0	100,2	100,0	786969	2173
	14	1707,6	100,0	100,0	785398	2174
	15	1710,7	100,0	100,0	785398	2178
Varakappaleet	1	1782,2	104,9	100,0	823883	2163
	16	1710,4	100,2	100,0	786969	2173

[illegible][illegible]

Massa:	KE6
Runkoaine:	Kivituhka 0-3, Malmgård
Sideaine:	Ecolan uusiosideaine, toimitettu 9.3.2018
Sideaineen määrä:	6,0 %
Aktivaattori:	-
Aktivaattorin määrä:	0,0 %
Tavoiteltu kosteus:	10,7 %
Mitattu kosteus:	10,2 %
Valmistus pvm:	12.3.2018


Puristuslujuus 7d:	3,40 MPa	19.3.2018			
Puristuslujuus 28d:	7,36 MPa	9.4.2018			
Pakkasrapautumiskestävyyys:	97,83 %	6.4.2018	-	16.4.2018	17.4.2018

Koekappaleet valmistuksen jälkeen	Nro	Massa [g]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Tilavuus [mm ³]	Tiheys [g/dm ³]
Puristuslujuus 7d	1	1730,0	100,3	100,0	787754	2196
	2	1738,0	100,6	100,0	790111	2200
	3	1732,9	100,3	100,0	787754	2200
Puristuslujuus 28d	4	1732,7	100,6	100,0	790111	2193
	5	1733,5	100,4	100,0	788540	2198
	6	1733,9	100,4	100,0	788540	2199
Pakraspautumiskestävyys SET A	8	1732,7	100,3	100,0	787754	2200
	9	1732,1	100,1	100,0	786184	2203
	10	1733,2	100,4	100,0	788540	2198
Pakraspautumiskestävyys SET B	11	1732,6	100,2	100,0	786969	2202
	12	1735,2	100,4	100,0	788540	2201
	13	1731,8	100,2	100,0	786969	2201
Varakappaleet	14	1735,4	100,5	100,0	789325	2199
	15	1735,5	100,1	100,0	786184	2207
	16	1731,8	100,7	100,0	790896	2190

[illegible][illegible]

[illegible]

Liite 2. KaM 0/32 CE-merkki ja suoritustasoilmoitus

	
17	
Lemminkäinen Infra Oy PL 169 00181 HELSINKI	
DOP n:o LIOY-1-118-3	
SFS-EN 13242 Maa- ja vesirakentamisessa ja tierakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset 0/32, tuotantoerä 1388-10003, Vantaa Voutila, 1380/14, 200452 Murskattu kalliokiviaines	
Raekoko	0/32
Rakeisuus	G _A 85 GT _A 20
Raemuoto	Fl ₃₅
Kiintotiheys	2,80 Mg/m ³
Vedenimeytyminen	0,30 %
Hienoainespitoisuus	f ₃
Murtopintaisten rakeiden osuus	NPD
Iskunkestävyys	LA ₂₀
Koostumus	Kiviaines on pääosin hienorakeista tummaa liusketta, joka koostuu särmikkäistä kivilajifragmenteista. Tumma liuske 79 %, vaaleanharmaa kvartsi-maasälpäliuske 19 %, vaalea pegmatiitti 2 %
Happoliukoiset sulfaatit Kokonaisriikki	AS _{NR} Hyväksytty S<1%
Jäädytys-sulatuskestävyys	Hyväksytty, WA ₂₄ 1

Nro LIOY-1-118-3

1. Tuotetyypin yksilöllinen tunniste

0/32, tuotantoerä 1388-10003, Vantaa Voutila, 1380/14, 200452

2. Aiottu käyttötarkoitus (aiotut käyttötarkoitukset)

Maa- ja vesirakentamisessa ja tierakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset

3. Valmistaja

Lemminkäinen Infra Oy, PL169, 00181 Helsinki

5. Suoritustason pysyvyyden arvioinnissa ja varmentamisessa käytetty järjestelmä:

AVCP-järjestelmä 4

6a. Yhdenmukaistettu standardi

SFS-EN 13242:2002+ A1:2007

7. Ilmoitetut suoritustasot

Perusominaisuus	Suoritustaso	Yhdenmukaistetut tekniset eritelmät
Raekoko	0/32	SFS-EN 13242:2002 + A1:2007
Rakeisuus	G _A 85 GT _A 20	
Raemuoto	FI ₃₅	
Kiintotiheys	2,80 Mg/m ³	
Vedenimeytyminen	0,30 %	
Hienoainespitoisuus	f ₃	
Murtopintaisten rakeiden osuus	NPD	
Iskunkestävyys	LA ₂₀	
Koostumus	Kiviaines on pääosin hienorakeista tummaa liusketta, joka koostuu särmikkäistä kivilajifragmenteista. Tumma liuske 79 %, vaaleanharmaa kvartsi-maasälpäliuske 19 %, vaalea pegmatiitti 2 %	
Happoliukoiset sulfaatit	AS _{NR}	
Kokonaisriikki	Hyväksytty S<1%	
Jäädytys-sulatuskestävyys	Hyväksytty, WA ₂₄ 1	

Edellä yksilöidyn tuotteen suoritustaso on ilmoitettujen suoritustasojen joukon mukainen. Tämä suoritustasoilmoitus on asetuksen (EU) N:o 305/2011 mukaisesti annettu edellä ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla.

Valmistajan puolesta allekirjoittanut:

Karoliina Mattsson

Salo

5.4.2017

Karoliina Mattsson

Lemminkäinen

Seutulan kiviaineslaboratorio

KIVIAINESNÄYTTEIDEN YHTEENVETORAPORTTI

Työn tilaaja:

Työkohde:

Näyteryhmä:

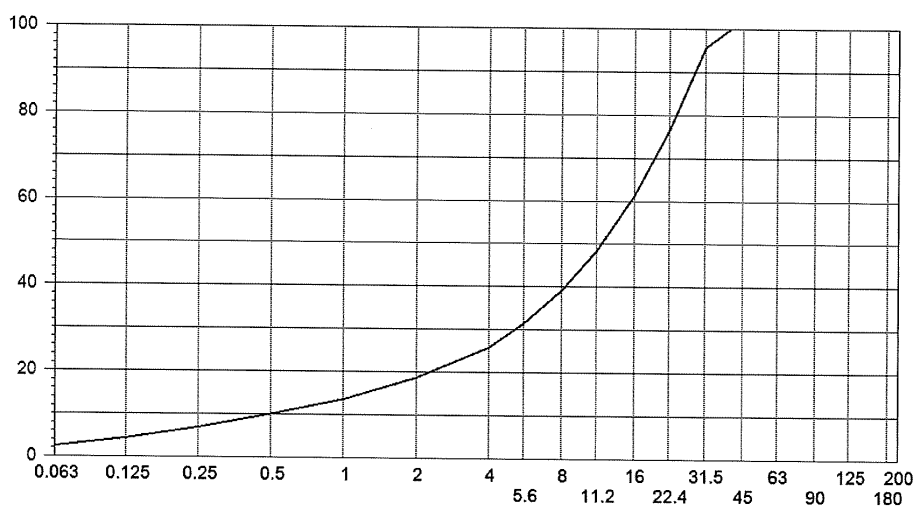
Lisätietoja:

Näytelaji: **KaM 0/32**Projektinro: **17T1KSE Voutila 1388/10003/106259**

DoP: *

0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	40		Rakei suus, pesus eulont a, <31 mm	Littey sluku
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		%	

Kpl	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	6		3
Keskiarvo	2,4	4	7	10	14	19	26	31	39	48	61	77	96	100		22

**MÄÄRITYSMENETELMÄT**

SFS-EN 933-1

SFS-EN 933-3

Rakeisuus, pesuseulonta, <31 mm

Litteysluku

13.7.2017 Hyväksynyt: Karoliina Mattsson

Lemminkäinen Infra Oy

Puh

Testausselosteen saa kopioida vain kokonaan.

Y-tunnus 2138243-1
Kotipaikka Helsinki

INNOLAB Tulostuspäivä 13.07.2017 11:25

* = varmentamaton menetelmä

Nämä tulokset koskevat vain tutkittuja näytteitä

Liite 3. KaM 0/3 CE-merkki ja suoritustasoilmoitus

CE	
17	
Lemminkäinen Infra Oy PL 169 00181 HELSINKI	
0416 - CPD - 4705 DOP n:o LIOY-1-122-11	
SFS-EN 13043 Kiviainekset teiden, lentokenttien ja muiden liikennöityjen alueiden asfalttimassoihin ja pintauksiin KaM 0/3, tuotantoerä 1390-10004, Loviisa Malmgård, 1450/21, 200581	
Raekoko	0/3
Rakeisuus	G _{A85}
Raemuoto	FI _{NR}
Kiintotiheys	2,63 Mg/m ³
Vedenimeytyminen	0,30 %
Murtopintaisten rakeiden osuus	NPD
Nastarengaskulutuskestävyys	A _{N7}
Koostumus	Granodioriitti
Jäädytys-sulatuskestävyys	Hyväksytty, WA ₂₄₁
Hienoainespitoisuus	f ₇

SUORITUSTASOILMOITUS**Nro LIOY-1-122-11****1. Tuotetyypin yksilöllinen tunniste**

KaM 0/3, tuotantoerä 1390-10004, Loviisa Malmgård, 1450/21, 200581

2. Aiottu käyttötarkoitus (aiotut käyttötarkoitukset)

Kiviainekset teiden, lentokenttien ja muiden liikennöityjen alueiden asfalttimassoihin ja pintauksiin

3. Valmistaja

Lemminkäinen Infra Oy, PL169, 00181 Helsinki

5. Suoritustason pysyvyyden arvioinnissa ja varmentamisessa käytetty järjestelmä:

AVCP-järjestelmä 2+

6a. Yhdenmukaistettu standardi

SFS-EN 13043:2002 + AC:2004

Ilmoitettu laitos

Inspecta Sertifiointi Oy, CPD/0416

Ilmoitetun laitoksen todistus:

No. 0416-CPD-4705

7. Ilmoitetut suoritustasot

Perusominaisuus	Suoritustaso	Yhdenmukaistetut tekniset eritelvät
Raekoko	0/3	SFS-EN 13043:2002 + AC:2004
Rakeisuus	G _A 85	
Raemuoto	FI _{NR}	
Kiintotiheys	2,63 Mg/m ³	
Vedenimeytyminen	0,30 %	
Murtopintaisten rakeiden osuus	NPD	
Nastarengaskulutuskestävyys	A _N 7	
Koostumus	Granodioriitti	
Jäädytys-sulatuskestävyys	Hyväksytty, WA ₂₄ 1	
Hienoainespitoisuus	f ₇	SFS-EN 13043:2002 + AC:2004

Edellä yksilöidyn tuotteen suoritustaso on ilmoitettujen suoritustasojen joukon mukainen. Tämä suoritustasoilmoitus on asetuksen (EU) N:o 305/2011 mukaisesti annettu edellä ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla.

Valmistajan puolesta allekirjoittanut:

Karoliina Mattsson

Salo

5.6.2017



Lemminkäinen

Seutulan kiviaineslaboratorio

KIVIAINESNÄYTTEIDEN YHTEENVETORAPORTTI

Työn tilaaja: *

Työkohte: *

Näytteryhmä: *

Lisätietoja:

Näytelaji: **KaM 0/3**Projektinro: **17T6KSE Malmgård 1390/10004/106263**

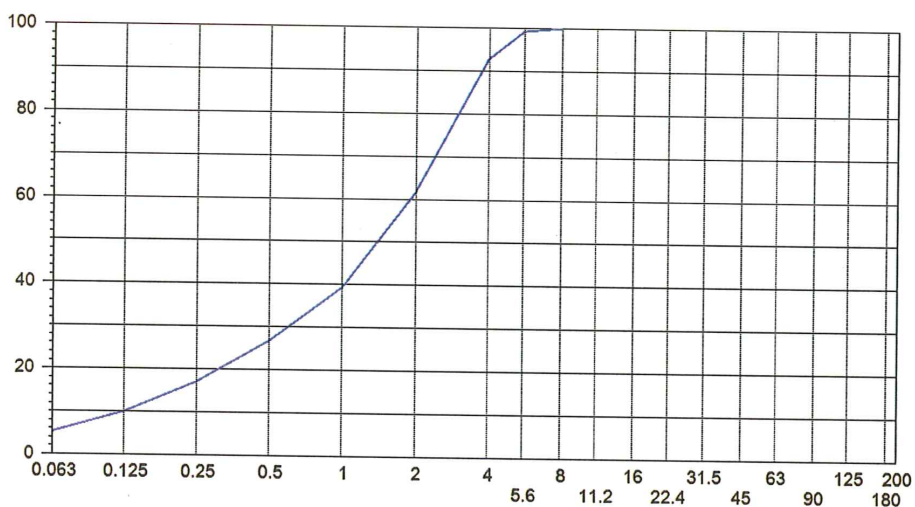
DoP: *

0.063 0.125 0.25 0.5 1 2 4 5.6 8 11.2 16 22.4

% % % % % % % % % % % % %

Rakei
suus,
pesu
seulont
a, <31
mm
%

Kpl	19	19	19	19	19	19	19	19	18
Keskiarvo	5,3	10	17	27	39	62	93	99	100



MÄÄRITYSMENETELMÄT

SFS-EN 933-1

Rakeisuus, pesuseulonta, <31 mm

30.8.2017 Hyväksynyt: Karoliina Mattsson

Lemminkäinen Infra Oy

Puh

Testausselosteen saa kopioida vain kokonaan.

Y-tunnus 2138243-1
Kotipaikka Helsinki

INNOLAB Tulostuspäivä 30.08.2017 15:30

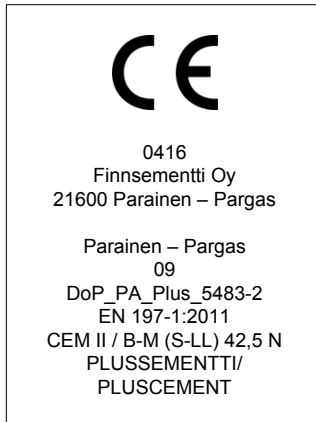
* = varmentamaton menetelmä

Nämä tulokset koskevat vain tutkittuja näytteitä

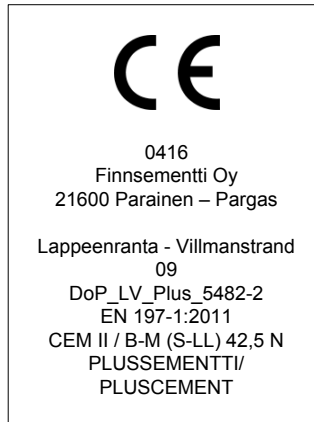
Liite 4 Plussementti CEM II /B-M (S-LL) 42,5 N CE-merkki ja suoritustasoilmoitus

Tuote/Toimituspaikkakunnat Produkt/Leveransorter

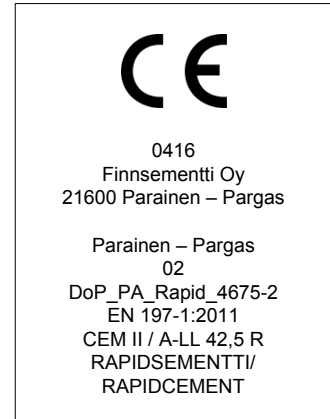
PLUSSEMENTTI/
PLUSCEMENT
Parainen/Pargas, Oulu/Uleåborg
Pietarsaari/Jakobstad



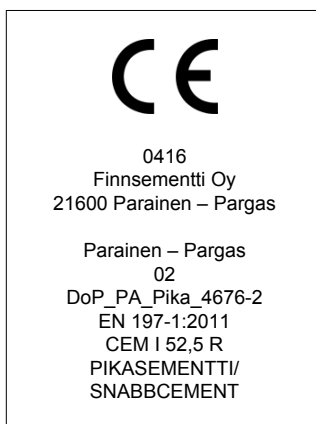
PLUSSEMENTTI/
PLUSCEMENT
Lappeenranta/Villmanstrand



RAPIDSEMENTTI/
RAPIDCEMENT
Parainen/Pargas, Kantvik,
Oulu/Uleåborg, Pietarsaari/Jakobstad,
Maarianhamina/Mariehamn



PIKASEMENTTI/
SNABBCEMENT
Parainen/Pargas



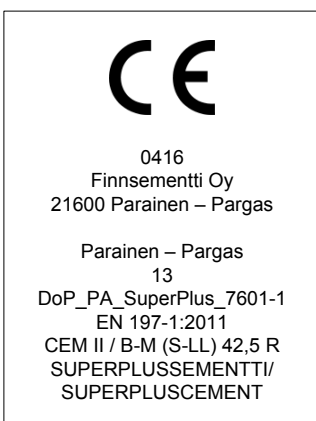
PIKASEMENTTI/
SNABBCEMENT
Lappeenranta/Villmanstrand



RAPIDSEMENTTI/
RAPIDCEMENT
Lappeenranta/Villmanstrand



SUPERPLUSSEMENTTI/
SUPERPLUSCEMENT
Parainen/Pargas



SR-SEMENTTI/
SR-CEMENT
Lappeenranta/Villmanstrand



KJ400

Raahe/Brahestad,
Pori/Björneborg



0416
Finnsementti Oy
21600 Parainen - Pargas

Raahe
08
0416-CPD-5481
EN 15167-1

Jauhettu granuloitu masuunikuona
käytettäväksi betoniin, laastiin ja
juotoslaastiin

VALKOSEMENTTI/
VITCEMENT

Parainen/Pargas



0615
Aalborg Portland A/S
Rørdalsvej 44
DK-9100 Aalborg, Denmark

Aalborg
14
0615-CPD-9806 Nro 1 (7/2013)
EN 197-1:2011
CEM I 52,5 R – SR 5
VALKOSEMENTTI/
VITCEMENT

MEGASEMENTTI/
MEGACEMENT

Kantvik



0956
AS Kunda Nordic Tsement
Jaama 2
E-44106 Kunda, Estonia

Kunda
14
0956-CPR-1221.1014
EN 197-1:2011
CEM I 52,5 N
MEGASEMENTTI/
MEGACEMENT



FINNSEMENTTI

SUORITUSTASOILMOITUS / PRESTANDEKLARATION

Nro / Nr DoP_PA_Plus_5483-2

Annettu / Utfärdat 7.2.2014

1. Tuotetyypin yksilöllinen tunniste / Produkttypens unika identifikationskod
CEM II / B-M (S-LL) 42,5 N

2. Tuotetyyppi / Produkttyp
CEM II / B-M (S-LL) 42,5 N Paraisten Plussementti
CEM II / B-M (S-LL) 42,5 N Pargas Pluscement

3. Valmistajan ennakoima rakennustuotteen aiottu käyttötarkoitus / Byggproduktens avsedda användning såsom förutsett av tillverkaren
Betonin, laastin, injektointilaastin sekä muiden rakenteissa ja rakennustuotteiden valmistuksessa käytettävien seosten valmistamiseen.

För betong, bruk, injekteringsmassa samt för framställning av blandningar använda i konstruktioner och byggprodukter.

4. Valmistaja / Tillverkare
Finnsementti Oy
Paraisten sementtitehdas
Skräbbölentie 18, 21600 PARAINEN

6. AVCP-menettely / AVCP-förfarande
Järjestelmä 1+ / System 1+

7. Harmonisoituun tuotestandardiin perustuva DoP / DoP baserande på harmoniserad produktstandard
Standardi / Standard **EN 197-1**
Annettu sertifikaatti / Utfärdat certifikat **0416-CPR-5483**

Ilmoitettu laitos Inspecta Sertifiointi Oy, jolla sertifikaatti nro. 0416, on tehnyt tuotteen alkutestauksen kyseeseen tulevien ominaisuuksien osalta sekä suorittanut tehtaan ja sen sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastuksen. Inspecta Sertifiointi Oy valvoo jatkuvasti tehtaan suorittamaa sisäistä tuotannon laadunvalvontaa sekä arvioi ja hyväksyy sen sekä testaa tehtaalta, markkinoilta tai rakennuspaikalta otetut pistokoenäytteet.

Det anmälda organet Inspecta Sertifiointi Oy, vars certifikatnummer är 0416, har utfört typprovning av relevanta egenskaper, första besiktning av fabriken och fabriken tillverkningskontroll och utför kontinuerlig övervakning, bedömning och godkännande av fabriken tillverkningskontroll samt utför provning av produkter uttagna på fabrik, på marknaden eller på byggplats.

Finnsementti Oy

Skräbbölentie 18
21600 Parainen
Puh. 0201 206 200
Fax. 0201 206 311

Poikkitie 105
53500 Lappeenranta
Puh. 0201 206 200
Fax. 0201 206 410

Lars Sonckin kaari 16 (PI 115)
02601 Espoo
Puh. 0201 206 200
Fax. 0201 206 202
www.finnsementti.fi
info@finnsementti.fi

Kotipaikka: Parainen
Y-tunnus: 1628387-7



FINNSEMENTTI

9. Ilmoitetut suoritusastot / Angiven prestanda

Perusominaisuudet Väsentliga egenskaper	Suoritusasto Prestanda	Yhdenmukaistetut tekniset eritelmät Harmoniserad teknisk specifikation
Tavallisten sementtien koostumus ja merkintä / Sammansättning och märkning för ordinära cement	CEM II/B-M (S-LL)	EN 197-1:2011
Puristuslujuus (varhais- ja standardilujuus) / Tryckhållfasthet (tidig och standardhållfasthet)	42,5N	
Sitoutumisaika / Bindetid	≥ 60 min	
Tilavuuden pysyvyys / Volymbeständighet	≤ 10 mm	
Sulfaattipitoisuus / Sulfathalt (SO ₃)	≤ 3,5 %	
Kloridipitoisuus / Kloridhalt	≤ 0,1 %	

10. Edellä 1 ja 2 kohdassa yksilöidyn tuotteen suoritusastot ovat 9 kohdassa ilmoitettujen suoritusastojen mukaiset. / Prestandan för den produkt som anges i punkterna 1 och 2 överensstämmer med den prestanda som anges i punkt 9.

Tämä suoritusastoilmoitus on annettu 4 kohdassa ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla. / Denna prestandadeklaration utfärdas på eget ansvar av den tillverkare som anges under punkt 4.

Valmistajan puolesta allekirjoittanut / Undertecknat för tillverkaren av:

Espoossa 7.2.2014,

Kalervo Matikainen
Toimitusjohtaja / Verkställande direktör

Liite 5. Masuunikuonajauhe KJ400 CE-merkki ja suoritustasoilmoitus

 **SERTIFIKAATTI SUORITUSTASON
PYSYVYYDESTÄ**
0416-CPR-5481-04

Inspecta

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) N:o 305/2011
(eurooppalainen rakennustuoteasetus, CPR), annettu 9. päivänä maaliskuuta 2011,
mukaisesti tämä sertifikaatti myönnetään rakennustuotteelle

**Betoniin, laastiin ja juotoslaastiin käytettävä
jauhettu granuloitu masuunikuona.**

Tuotteen on saattanut markkinoille omalla nimellään tai tavaramerkillään

**Finnsementti Oy
Raahen tehdas**

Skräbbölentie 18, 21600 PARAINEN

ja sen valmistuspaikka on Raahen

Tällä sertifikaatilla vahvistetaan, että kaikki suoritustason pysyvyyden arviointiin ja varmentamiseen
liittyvät ehdot, jotka on esitetty seuraavan standardin liitteessä ZA

EN 15167-1:2006

ja tässä sertifikaatissa ilmoitetut suoritustasot täyttyvät järjestelmän 1+ mukaisesti ja että valmistajan tekemä
tuotannon sisäinen laadunvalvonta on arvioitu, jotta varmistetaan
rakennustuotteen suoritustasojen pysyvyys.

Tämä sertifikaatti on myönnetty ensimmäisen kerran **2008-12-19** ja on voimassa toistaiseksi, ellei
yhdenmukaistettua standardia, rakennustuotetta, AVCP-menetelmiä eikä valmistusolosuhteita tuotantolaitoksella
ole oleellisesti muutettu tai ellei ilmoitettu tuotesertifiointilaitos ole sertifikaattia keskeyttänyt tai peruuttanut.

Tämän sertifikaatin voimassaolon voi tarkistaa osoitteesta www.inspecta.fi.

Inspecta Sertifiointi Oy, ilmoitettu laitos n:o 0416, on myöntänyt tämän sertifikaatin 2016-08-31



Tomi Kasurinen, toimitusjohtaja



Inspecta Sertifiointi Oy
P.O. Box 1000, Sörnäistenkatu 2
FI-00581 Helsinki, Finland
Tel. +358 10 521 600

Group headquarters: Inspecta Group Oy, Helsinki, Finland

TRUST & QUALITY www.inspecta.com



FINNSEMENTTI

SUORITUSTASOILMOITUS / PRESTANDEKLARATION

Nro / Nr DoP EN15167-1_RH_KJ400_0416CPD5481-1

Annettu / Utfärdat 19.6.2013

1. Tuotetyypin yksilöllinen tunniste / Produkttypens unika identifikationskod
Masuunikuonajauhe KJ400

2. Tuotetyyppi / Produkttyp

Betoniin, laastiin ja juotoslaastiin käytettävä jauhettu granuloitu masuunikuona.

3. Valmistajan ennakoima rakennustuotteen aiottu käyttötarkoitus / Byggproduktens avsedda användning såsom förutsett av tillverkaren

Betonin, laastin, injektointilaastin sekä muiden rakenteissa ja rakennustuotteiden valmistuksessa käytettävien seosten valmistamiseen.

För betong, bruk, injekteringsmassa samt för framställning av blandningar använda i konstruktioner och byggprodukter.

4. Valmistaja / Tillverkare

Finnsementti Oy

Raahen tehdas

Skräbbölentie 18, 21600 PARAINEN

6. AVCP-menettely / AVCP-förfarande

Järjestelmä 1+ / System 1+

7. Harmonisoituun tuotestandardiin perustuva DoP / DoP baserande på harmoniserad produktstandard

Standardi / Standard **EN 15167-1**

Annettu sertifikaatti / Utfärdat certifikat **0416-CPD-5481**

Ilmoitettu laitos Inspecta Sertifiointi Oy, jolla sertifikaatti nro. 0416, on tehnyt tuotteen alkutestauksen kyseeseen tulevien ominaisuuksien osalta sekä suorittanut tehtaan ja sen sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastuksen. Inspecta Sertifiointi Oy valvoo jatkuvasti tehtaan suorittamaa sisäistä tuotannon laadunvalvontaa sekä arvioi ja hyväksyy sen sekä testaa tehtaalta, markkinoilta tai rakennuspaikalta otetut pistokoenäytteet.

Det anmälda organet Inspecta Sertifiointi Oy, vars certifikatnummer är 0416, har utfört typprovning av relevanta egenskaper, första besiktning av fabriken och fabriken tillverkningskontroll och utför kontinuerlig övervakning, bedömning och godkännande av fabriken tillverkningskontroll samt utför provning av produkter uttagna på fabrik, på marknaden eller på byggplats.

Finnsementti Oy

Skräbbölentie 18
21600 Parainen
Puh. 0201 206 200
Fax. 0201 206 311

Poikkitie 105
53500 Lappeenranta
Puh. 0201 206 200
Fax. 0201 206 410

Lars Sonckin kaari 16 (PI 115) www.finnsementti.fi
02601 Espoo info@finnsementti.fi
Puh. 0201 206 200
Fax. 0201 206 202

Kolipaikka Parainen
Y-tunnus 1628387-7



FINNSEMENTTI

9. Ilmoitetut suoritustasot / Angiven prestanda

Perusominaisuudet Väsentliga egenskaper	Suoritustaso Prestanda	Yhdenmukaistetut tekniset eritelmät Harmoniserad teknisk specifikation
Puristuslujuus (Aktiivisuusindeksi) / Tryckhållfasthet (Aktivitetsindex)	7 vrk ≥ 45 % 28 vrk ≥ 70 % (vrk = d)	EN 15167-1:2006
Sitoutumisaika / Bindetid	≤ 2 x vertailusementin / ≤ 2 x referenscement	
Hienous / Specifik yta	≥ 275 m ² /kg	
Magnesiumoksidipitoisuus / Magnesiumoksidhalt	≤ 18 %	
Sulfidipitoisuus / Sulfidhalt (S)	$\leq 2,0$ %	
Sulfaattipitoisuus / Sulfathalt (SO ₃)	$\leq 2,5$ %	
Hehkutushäviö, korjattuna Glödförlust, korrigerad	$\leq 3,0$ %	
Kloridipitoisuus / Kloridhalt	$\leq 0,10$ %	
Kosteuspitoisuus / Fukthalt	$\leq 1,0$ %	

10. Edellä 1 ja 2 kohdassa yksilöidyn tuotteen suoritustasot ovat 9 kohdassa ilmoitettujen suoritustasojen mukaiset. / Prestandan för den produkt som anges i punkterna 1 och 2 överensstämmer med den prestanda som anges i punkt 9.

Tämä suoritustasoilmoitus on annettu 4 kohdassa ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla. / Denna prestandadeklaration utfärdas på eget ansvar av den tillverkare som anges under punkt 4.

Valmistajan puolesta allekirjoittanut / Undertecknat för tillverkaren av:

Espoossa 19.6.2013,

Kalervo Matikainen
Toimitusjohtaja / Verkställande direktör